

# **ESTUDO DO ESCOAMENTO DO VENTO ATRAVÉS DE UMA TORRE TRELIÇADA ESPACIAL**

**ANDRÉ IVAN DE ALMEIDA COSTA**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS**

---

Orientador: Professor Doutor Rui Manuel de Menezes e Carneiro de  
Barros

---

Coorientador: Mestre Fábio Moutinho Paiva

JULHO DE 2014

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A Vós

*“Já fiz todos os cálculos; o destino fará o resto”*

*Napoleão Bonaparte*





## **AGRADECIMENTOS**

O espaço limitado desta secção de agradecimentos seguramente não me permite agradecer, como pretendia, a todas as pessoas que ao longo da minha formação em Engenharia Civil me ajudaram, direta ou indiretamente, a alcançar os meus objetivos e a realizar mais esta etapa da minha formação académica. Desta forma, a vós, deixo apenas algumas palavras, com um sentido e profundo sentimento de reconhecido agradecimento.

Ao Professor Doutor Rui Manuel de Menezes e Carneiro de Barros, expresso o meu profundo agradecimento pela orientação e apoio incondicional que muito elevaram os meus conhecimentos científicos e, sem dúvida, muito estimularam o meu desejo de querer sempre saber mais e a vontade constante de querer fazer melhor.

Ao Mestre Fábio Moutinho Paiva, o meu sincero agradecimento pela coorientação neste projeto. Muito obrigado pelo profissionalismo, pela amizade e pela total disponibilidade que sempre revelou para comigo. O seu apoio foi determinante na elaboração desta dissertação.

E como este percurso não poderia ser feito sem vocês, aos meus Amigos, especialmente aos que fizeram esta viagem comigo, um agradecimento especial pelo vosso companheirismo e amizade, que resultou em momentos jamais esquecidos. Obrigado a vós.

Fazendo parte desta lista restrita de Amigos, mas merecendo um lugar de destaque, ao meu Irmão, Manuel Clemente companheiro de aventuras e folias, pela amizade, pelo conhecimento transmitido e sobretudo pela presença constante, um agradecimento muito especial por tudo.

À minha namorada, Fábria Reboredo, presente e atenta às dúvidas, desassossegos, desalentos e sucessos, pelo apoio, pela confiança e pela valorização sempre tão entusiasta do meu trabalho, dando-me, desta forma, ânimo para ultrapassar a culpa pelo tempo que a cada dia lhe subtraía, um agradecimento profundamente especial por fazeres parte de mim.

E como não poderia faltar, os últimos são sempre os primeiros, aos meus Pais porque sem eles não estaria aqui hoje, pela educação e conhecimento transmitido, o meu agradecimento sincero por tudo.



## RESUMO

O avanço da sociedade em geral, tem estimulado em diversas áreas, como nas engenharias civil, mecânica e *offshore*, uma necessidade de se procurarem soluções estruturais cada vez mais sofisticadas. Em muitos casos essas soluções recorrem a estruturas treliçadas espaciais, que de forma a satisfazer vários requisitos funcionais resultam em estruturas com geometrias cada vez mais complexas. A Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) surge então, como ferramenta que procura realizar uma rápida e económica análise do escoamento do vento em torno dessas estruturas, ultrapassando assim limitações impostas pelas normas atuais face às diversas tipologias estruturais e seccionais.

Assim, no decorrer desta dissertação apresenta-se o conceito de Dinâmica de Fluidos Computacional, os princípios fundamentais que a regem assim como a sua importância na evolução da Engenharia do Vento. Foi ainda apresentada uma pequena abordagem histórica do tema, assim como os campos de aplicação em que se insere. Dentro do conceito de Dinâmica de Fluidos Computacional foram abordadas classes de modelos de turbulência, assim como vários tipos de malhas que se podem criar, ambos temas importantes quando se estuda um modelo computacional. Estudou-se o escoamento em torno de uma secção angulosa, para vários tipos de regimes turbulentos e várias disposições da secção, contemplando a exposição dos conceitos de coeficientes de arrasto e de sustentação. O estudo foi realizado em 2D através de uma análise computacional CFD no *ANSYS Fluent*, que culminou na determinação do coeficiente de arrasto, com posterior comparação/validação por várias normas, nomeadamente pela EN 1991-1-4, EN 1993-3-1 e Britânica (B.S), bem como por estudos experimentais já realizados em outras dissertações.

A análise anterior estabeleceu o ponto de partida para o estudo aerodinâmico de uma torre treliçada, onde são observados os deslocamentos e reações causados pela ação do vento através de uma análise estática pelo *software Autodesk Robot Structural Analysis* de acordo com a EN 1991-1-4 e por uma análise CFD.

Com isto, verificou-se que os modelos de turbulência não afetavam o comportamento aerodinâmico da estrutura, e que as normas atuais apresentam resultados conservativos para o estudo de torres treliçadas espaciais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Torres treliçadas, vento, aerodinâmica, CFD, EN 1991-1-4.



## ABSTRACT

The advance of society in general, has stimulated in various fields, such as civil mechanical and offshore engineering, a need to look for more sophisticated structural solutions. In many cases, these solutions resort to lattice structures that, in order to meet several functional requirements, result in structures ever more complex in geometry. As such, Computational Fluid Dynamics (CFD) arises as a tool to achieve a quick and economic analysis of wind flow around these structures, thereby overcoming limitations imposed by current codes that do not cover all structure typologies and sectional differences.

Thus, in the course of this dissertation the concept of computational fluid dynamics is presented, as well as the fundamental principles which govern them, and their importance in the evolution of Wind Engineering. A small historical approach to the subject, and the fields of application in which it operates, were also presented. Within the concept of computational fluid dynamics, turbulence class models were discussed, as well as several mesh types that can be created, both important topics when studying a computational model. The flow around an angular section was studied for various turbulent regimes and cross-section layouts, considering the concept description of drag and lift coefficients. The study was conducted with a 2D CFD computational analysis in ANSYS Fluent, that concluded in the drag coefficient determination, with subsequent comparison / validation with several standards, including the EN 1991-1-4, EN 1993 -3-1 and British (BS) , as well as experimental studies conducted in other dissertations.

The previous analysis established the starting point for the aerodynamic study of a lattice tower, in which the displacements and reactions caused by wind action are observed through a static analysis in *Autodesk Robot Structural Analysis software* according to EN 1991-1-4 and a CFD analysis.

It was found that the turbulence models did not affect the aerodynamic behavior of the structure, and that the current codes lead to conservative results for the study of lattice towers.

**KEYWORDS:** Lattice towers, wind, aerodynamics, CFD, EN 1991-1-4.



## ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	v

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....	1
1.2. ACIDENTES EM TORRES TRELIÇADAS .....	1
1.3. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	2
1.3.1. OBJETIVOS .....	2
<b>2 DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL .....</b>	<b>5</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	5
2.2. PERSPETIVA HISTÓRICA DO CFD .....	5
2.3. O QUE É DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL? .....	5
2.4. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS QUE REGEM O MOVIMENTO DO FLUIDO .....	6
2.4.1. EQUAÇÃO DE CONTINUIDADE .....	6
2.4.2. EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO DINÂMICO .....	6
2.4.3. PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA .....	7
2.4.4. EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES .....	7
2.5. MODELOS DE TURBULÊNCIA .....	8
2.5.1. STANDARD K – $\epsilon$ .....	9
2.5.2. RNG K – $\epsilon$ .....	9
2.5.3. REALIZABLE K – $\epsilon$ .....	11
2.6. MÉTODO DE DISCRETIZAÇÃO .....	12
2.6.1. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS .....	12
2.7. MALHAS .....	14
2.8. CAMPO DE APLICAÇÃO DO CFD E SUA IMPORTÂNCIA .....	16
2.9. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO CFD .....	16
2.10. APLICAÇÃO DO CFD À ENGENHARIA DO VENTO .....	17
<b>3 ESTUDO AERODINÂMICO DE PERFIS DE SECÇÃO ANGULOSA .....</b>	<b>21</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	21

<b>3.2. AERODINÂMICA EM CORPOS NÃO-FUSELADOS.....</b>	<b>21</b>
<b>3.3. FORÇAS DE ARRASTO E SUSTENTAÇÃO .....</b>	<b>21</b>
<b>3.4. COEFICIENTE DE ARRASTO E DE SUSTENTAÇÃO .....</b>	<b>22</b>
<b>3.5. COEFICIENTE DE ARRASTO SEGUNDO O EUROCÓDIGO 1 .....</b>	<b>22</b>
3.5.1. FORÇAS EXERCIDAS PELO VENTO.....	23
3.5.2. ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE SECÇÃO RETANGULAR .....	23
3.5.3. ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE SECÇÃO COM ARESTAS VIVAS .....	25
3.5.4. ESTRUTURAS TRELIÇADAS .....	25
3.5.5. ESBELTEZA EFETIVA E COEFICIENTE DE EFEITOS DE EXTREMIDADE .....	27
<b>3.6. ESCOAMENTO EM TORNO DE UMA SECÇÃO ANGULOSA ISOLADA .....</b>	<b>29</b>
3.6.1. GEOMETRIA DA SECÇÃO .....	29
3.6.2. PROPRIEDADES DO DOMÍNIO DE INTEGRAÇÃO DA SECÇÃO .....	29
3.6.3. CRIAÇÃO E PROPRIEDADES DA MALHA.....	30
3.6.4. MODELAÇÃO <i>ANSYS FLUENT</i> .....	32
3.6.4.1. Propriedades do Escoamento .....	32
3.6.4.2. Definição das condições de fronteira .....	32
3.6.4.3. Procedimento numérico para resolver as equações de Navier-Stokes .....	33
3.6.5. SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO .....	33
3.6.5.1. Resultados Experimentais.....	34
3.6.5.2. Simulação do escoamento com os modelos de turbulência $k-\epsilon$ .....	35
3.6.6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	37
3.6.7. CONCLUSÃO .....	39
<b>3.7. ESTUDO DA INTERAÇÃO ENTRE DUAS SECÇÕES ANGULOSAS .....</b>	<b>39</b>
3.7.1. PROPRIEDADES DO DOMÍNIO DE INTEGRAÇÃO DA SECÇÃO .....	39
3.7.2. CRIAÇÃO E PROPRIEDADES DA MALHA.....	40
3.7.3. MODELAÇÃO <i>ANSYS FLUENT</i> .....	41
3.7.4. SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO.....	41
3.7.5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS .....	45
3.7.6. CONCLUSÃO .....	45
<b>3.8. ESCOAMENTO EM TORNO DE UMA ESTRUTURA TRELIÇADA ESPACIAL .....</b>	<b>45</b>
3.8.1. PROPRIEDADES DO DOMÍNIO DE INTEGRAÇÃO DA SECÇÃO .....	46
3.8.2. CRIAÇÃO E PROPRIEDADES DA MALHA.....	46
3.8.4. SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO.....	48



3.8.5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS .....	49
3.8.6. CONCLUSÃO .....	49
<b>3.9. CONCLUSÃO .....</b>	<b>50</b>
<b>4 ESTUDO AERODINÂMICO DE UMA TORRE TRELIÇADA ESPACIAL SEGUNDO O EUROCÓDIGO E CFD .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2. DETERMINAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO .....</b>	<b>51</b>
4.2.1. PRESSÃO DO VENTO DE ACORDO COM O EUROCÓDIGO EN 1991-1-4. ....	51
4.2.2. COEFICIENTE DE FORÇA DE ACORDO A EN 1993-3-1. ....	55
4.2.3. COEFICIENTE ESTRUTURAL DE ACORDO A EN 1991-1-4. ....	60
4.2.3.1. Coeficiente de resposta quase estática .....	61
4.2.3.2. Fator de pico .....	61
4.2.3.3. Coeficiente de resposta em ressonância .....	62
4.2.3.4. Decremento logarítmico total de amortecimento .....	63
<b>4.3. GEOMETRIA, MATERIAL, SECÇÕES E LIGAÇÕES ENTRE BARRAS .....</b>	<b>65</b>
<b>4.4. CÁLCULO DA AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA .....</b>	<b>67</b>
4.4.1. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE FORÇA DA ESTRUTURA .....	68
4.4.2. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE ESTRUTURAL DA ESTRUTURA .....	68
4.4.3. DETERMINAÇÃO DA FORÇA DO VENTO .....	71
<b>4.5. ANÁLISE ESTÁTICA DA AÇÃO VENTO NA ESTRUTURA .....</b>	<b>71</b>
<b>4.6. ANÁLISE CFD DA AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA .....</b>	<b>74</b>
4.6.1. MODELAÇÃO DE UM MÓDULO DA ESTRUTURA .....	74
4.6.1.1. Simulação <i>Flow Simulation</i> .....	74
4.6.1.2. Características da Malha e do Domínio de Integração .....	77
4.6.1.3. Análise de Forças e Pressões Geradas .....	79
4.6.1.4. Análise Comparativa de Resultados .....	80
4.6.2. MODELAÇÃO DA ESTRUTURA .....	81
4.6.2.1. Características da Malha e do Domínio de Integração .....	81
4.6.2.2. Análise de Forças e Pressões Geradas .....	83
4.6.2.3. Análise Comparativa de Resultados .....	85
<b>4.7. ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES E REAÇÕES DA ESTRUTURA REFERENTES À ANÁLISE CFD .....</b>	<b>85</b>
4.7.1. VALIDAÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO DO <i>SOLIDWORKS</i> PARA A ANÁLISE ESTÁTICA .....	85
4.7.2. ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES E REAÇÕES DA ESTRUTURA ASSOCIADAS ÀS PRESSÕES OBTIDAS NA ANÁLISE CFD .....	86

<b>4.8. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS PELA ANÁLISE CFD E EUROCÓDIGO EN 1991-1-4 .....</b>	<b>88</b>
<b>4.9. CONCLUSÃO .....</b>	<b>89</b>
<b>5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>91</b>
<b>5.1. CONCLUSÃO .....</b>	<b>91</b>
<b>5.2. TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>92</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>93</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>95</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1.1 - Colapso de torres autoportantes metálicas treliçadas no Brasil[5].....	3
Fig.2.1 – Malha Estruturada[15].....	15
Fig.2.2 – Malha Não Estruturada[15] .....	15
Fig.2.3 – Malha estruturada por blocos com sobreposição[14] .....	15
Fig.2.4 – Processo de desenvolvimento do CFD.....	17
Fig.2.5 - Representação do escoamento, padrão, esperado em torno de um retângulo, adaptado de [11].....	18
Fig.2.6 - Secção da Ponte da Grande Ravine e suas medidas principais (mm)[11] .....	19
Fig.2.7 - Tanque e mesa sísmica durante as oscilações da superfície livre ou sloshing [18, 19] .....	19
Fig.3.1 - Coeficiente de força, $cf,0$ , para secções retangulares com arestas vivas e sem livre escoamento em torno das extremidades do elemento[20] .....	24
Fig.3.2 - Coeficiente de redução $\Psi_r$ para uma secção transversal quadrada com cantos arredondados[20] .....	24
Fig.3.3 - Secções estruturais com arestas vivas[20].....	25
Fig.3.4 – Estrutura treliçada[20] .....	25
Fig.3.5 - Coeficiente de força $cf,0$ para uma estrutura treliçada plana constituída por perfis de secção angulosa, em função do índice de cheios $\phi$ [20].....	26
Fig.3.6 - Coeficiente de força $cf,0$ para uma estrutura treliçada espacial constituída por perfis de secção angulosa, em função do índice de cheios $\phi$ [20] .....	26
Fig.3.7 – Definição do índice de cheios, $\phi$ [20].....	27
Fig.3.8 – Valores indicativos do coeficiente de efeitos de extremidade, $\psi_\lambda$ , em função do índice de cheios, $\phi$ , e da esbelteza, $\lambda$ [20] .....	28
Fig.3.9 – Perfil Metálico L 100x100x10 (mm).....	29
Fig.3.10 – Imagem retirada do ANSYS com as dimensões em função de $d$ , dimensão da aba.....	30
Fig.3.11 – Malha gerada no ANSYS Meshing .....	31
Fig.3.12 – Imagem ANSYS Fluent, descrição das condições de fronteira .....	33
Fig.3.13 – Convenção dos eixos e indicação dos ângulos de incidência do vento .....	34
Fig.3.14 – Comparação entre os coeficientes de força dos modelos E1 e E2, submetidos aos escoamentos suave e turbulento em função dos ângulos de incidência do vento, $-180^\circ$ a $180^\circ$ . [2] ...	34
Fig.3.15 – Escoamento em torno da secção para os ângulos de incidência $0^\circ, 45^\circ$ e $180^\circ$ correspondente a (a), (b) e (c) respetivamente.....	37
Fig.3.16 – Coeficiente de força $C_{fn}$ e $C_{ft}$ para elementos estruturais individuais (faces planas) de comprimento infinito, adaptado de [22] .....	38

Fig.3.17 – Imagem retirada do ANSYS com as dimensões em função de $d$ , dimensão da aba e $c$ , distância entre secções. ....	40
Fig.3.18 - Malha gerada no ANSYS Meshing .....	40
Fig.3.19 - Indicação da secção protegida e ângulo de incidência do vento.....	41
Fig.3.20 – Escoamento em torno da secção para a direção $0^\circ$ , em função de $c/d$ .....	44
Fig.3.21 – Disposição das secções, imagem Ansys Fluent .....	45
Fig.3.22 – Domínio integração Ansys Fluent, com as distâncias em função da aba da secção .....	46
Fig.3.23 – Malha gerada no ANSYS Meshing.....	47
Fig.3.24 – Escoamento em torno da estrutura, observação das linhas de corrente.....	48
Fig.4.1 – Coeficiente de exposição em função da altura[23] .....	54
Fig.4.2 – Área projetada dos painéis, adaptada de [21].....	56
Fig.4.3 – Fatores de incidência do vento mais comuns, adaptado de [21] .....	57
Fig.4.4 – Coeficiente de força normal, $c_{f,s,0}$ , para estruturas de base quadrada, adaptado de [21] .....	58
Fig.4.5 – Coeficiente de redução de elementos não estruturais, adaptado de [21].....	59
Fig.4.6 – Coeficiente típicos de componentes individuais, adaptado de [21] .....	59
Fig.4.7 – Formas gerais das construções abrangidas pelo método de cálculo, adaptado de [20] .....	60
Fig.4.8 – Fator de pico, adaptado de [20].....	62
Fig.4.9 – Valores aproximados do decremento logarítmico de amortecimento estrutural, adaptado de [20] .....	65
Fig.4.10 – Vista total, (a) e parcial (b) da torre treliçada, elementos principais e de travamento (modelo Robot) .....	66
Fig.4.11 - Representação do tipo de perfis na torre .....	67
Fig.4.12 – Excitações provocadas a estruturas por ações dinâmicas, vento e sismo[29] .....	68
Fig.4.13 – Modos de vibração com deslocamento locais em mm (modelo Robot).....	69
Fig.4.14 – Análise comparativa do modo fundamental de flexão .....	70
Fig.4.15 – Modelação adotada para os apoios .....	73
Fig.4.16 – Modulo da estrutura.....	74
Fig.4.17 – Imagem do Comando Wizard, Tipo de análise .....	75
Fig.4.18 - Imagem do Comando Wizard, Tipo de fluido .....	75
Fig.4.19 - Imagem do Comando Wizard, Condições de Parede.....	76
Fig.4.20 - Imagem do Comando Wizard, Condições Iniciais e de Ambiente .....	76
Fig.4.21 - Imagem do Comando Wizard, Resolução da Geometria e Resultados .....	77
Fig.4.22 – Representação do domínio de integração do modulo da torre (a) e suas dimensões (b) ...	78
Fig.4.23 – Malha Gerada para o módulo da estrutura .....	78

Fig.4.24 – Escoamento em torno do módulo, observação das linhas de corrente.....	79
Fig.4.25 – Gráfico de convergência da Força Global (X), (a) e da Pressão Dinâmica Máx (b) .....	80
Fig.4.26 – Perfil de Velocidades do Vento em altura .....	81
Fig.4.27 - Representação do domínio de integração da estrutura (a) e suas dimensões (b) .....	82
Fig.4.28 - Malha Gerada para a estrutura .....	82
Fig.4.29 - Gráfico de convergência da Força Global (X), (a) e da Pressão Dinâmica Máx (b) .....	84
Fig.4.30 – Vista das pressões na direção na face de barlavento da estrutura.....	84
Fig.4.31 – Deslocamentos obtidos pelo <i>software SolidWorks</i> (esq.) e pelo <i>software Robot</i> (dir.) .....	85
Fig.4.32 – Comando “ <i>External Loads – Flow Effects</i> ”, <i>SolidWorks</i> .....	86
Fig.4.33 – Deslocamentos da estrutura - Análise <i>SolidWorks</i> .....	87
Fig.4.34 – Deslocamento máximo da estrutura em mm .....	88



## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 - Falhas em torres espiadas[3].....	2
Quadro 3.1 - Esbelteza efetiva $\lambda$ [20].....	28
Quadro 3.2 – Parâmetros de qualidade da malha .....	32
Quadro 3.3 – Propriedades do Fluido .....	32
Quadro 3.4 – Coeficiente de Arrasto.....	35
Quadro 3.5 – Parâmetros para a determinação do Coeficiente de Arrasto segundo a EN 1991-1-4 ..	37
Quadro 3.6 – Quadro comparativo dos coeficientes de arrasto determinados em função do angulo de incidência.....	39
Quadro 3.7 – Parâmetros de qualidade da malha .....	41
Quadro 3.8 – Coeficientes de arrasto em função do fator (c/d).....	42
Quadro 3.9 - Parâmetros de qualidade da malha .....	47
Quadro 3.10 – Coeficientes de arrasto em função do modelo de turbulência.....	48
Quadro 3.11 – Parâmetros obtidos na determinação do índice de cheios, $\phi$ .....	49
Quadro 4.1 – Zoneamento do território [20].....	51
Quadro 4.2 – Valor básico da velocidade de referência do vento [20] .....	52
Quadro 4.3 – Categoria e parâmetros de terreno[20] .....	53
Quadro 4.4 – Coeficiente C1, C2 .....	58
Quadro 4.5 – Valores de $\xi$ [20] .....	64
Quadro 4.6 – Resultados Análise Modal.....	69
Quadro 4.7 – Comparação entre massas equivalentes por unidade de comprimento.....	71
Quadro 4.8 - Comparação entre coeficientes estruturais .....	71
Quadro 4.9 – Quadro geral da ação do vento.....	72
Quadro 4.10 – Cargas do vento aplicadas no Robot.....	73
Quadro 4.11 – Pressões e Forças resultantes.....	79
Quadro 4.12 – Forças e pressões geradas na estrutura .....	83
Quadro 4.13 – Reações nos apoios - Análise <i>SolidWorks</i> .....	87
Quadro 4.14 – Reações nos apoios.....	88





# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A ação do vento tem constituído ao longo da história da humanidade uma manifestação ambiental da maior importância, condicionando o comportamento do homem e das suas realizações. Este facto deu origem à aparição de importantes áreas científicas como a Meteorologia, a Micrometeorologia e a climatologia, que se ocupam da compreensão dos movimentos atmosféricos, bem como da Aerodinâmica, que, derivando da mecânica dos Fluidos, procura caracterizar a interação entre os escoamentos de massas de ar e os sistemas estruturais e quantificar as correspondentes ações que atuam sobre estes [1].

O princípio da aerodinâmica resultou diretamente do espetacular desenvolvimento da Aeronáutica no decorrer do Séc. XX, tendo possibilitado ferramentas de análise extraordinariamente úteis, de que são exemplo os túneis de vento [1].

Por outro lado, a ocorrência de alguns colapsos em grandes estruturas de elevada responsabilidade, devido à ação do vento, e o comportamento inadequado de muitas outras, vieram contribuir para realçar a importância da aerodinâmica no contexto da engenharia Civil, a qual desempenha atualmente um papel fundamental na análise do comportamento dinâmico de grandes estruturas complexas, marcadas por formas inovadoras. Daí a importância e vontade de afirmar a Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) como ferramenta de análise aerodinâmica, visto apresentar vantagens e facilidades que serão apresentadas nesta dissertação.

### 1.2. ACIDENTES EM TORRES TRELIÇADAS

Os principais responsáveis pelo colapso de torres treliçadas são os acontecimentos provocados por fenómenos meteorológicos, principalmente relacionados com ventos fortes.

Em setembro de 1961 no Houston Lighting Power Company, foram apresentados prejuízos de mais de 1,5 milhões de dólares causados pelo furacão Carla. Entre os anos de 1963 a 1973, 36 torres do sistema de linhas de transmissão da Nova Zelândia ruíram devido a ventos com altas velocidades ocorridos durante tempestade [2].

Entre os dias 10 a 22 de setembro de 1989 o furacão Hugo causou a destruição numa faixa entre Guadalupe e Virgínia, provocando o colapso de torres de linhas de transmissão. Ainda no continente americano em abril de 1996 ventos fortes causaram a ruína de torres de transmissão em Ontário, no Canadá [2].

Para além dos casos específicos apresentados anteriormente, o historial de falhas em torres é elevado em comparação com outras estruturas de igual importância económica e social. Dos registos existentes verifica-se que, nos últimos 40 anos, oito torres de grande altura (com cerca de 600 m) colapsaram nos Estados Unidos da América. Outras tantas torres, na sua maioria com 300 m de altura, colapsaram na Europa, incluindo a maior torre e, até à época, a estrutura mais alta do mundo, com 646 m de altura, na Polónia [3].

No Quadro 1.1 poderá observar-se as falhas registadas em torres nos últimos 40 anos, ordenada por alturas e por causas prováveis, sendo baseada em trabalhos desenvolvidos por membros do Grupo de Trabalho 4 do IASS – International Association for Shell and Spatial Structures [3]. Neste quadro apenas se apresenta os registos para torres com altura inferior a 200 m e suas causas principais de falhas.

Quadro 1.1 - Falhas em torres espiadas[3]

Causa	Altura (m)			
	0-50	51-100	101-150	151-200
Neve	14	34	19	21
Neve e Vento	7	7		2
Vento	3	3	1	2
Oscilações	1	5	1	3
Projeto/Materiais	1	5	2	4

A causa indicada como vento está limitada à ocorrência de velocidades do vento elevadas, no entanto, a causa primária poderá ter sido erros de conceção e/ou pormenorização, ou mesmo a utilização de materiais inapropriados[3]. Apesar de todas estas incertezas, o quadro apresenta uma valiosa informação sobre as ocorrências e as causas prováveis. Este tipo de causas, pode desencadear a necessidade de se recorrer a ensaios à escala real em bancos de ensaios, de forma a validar o modelo numérico subjacente à estrutura dimensionada. Atualmente a Faculdade de Engenharia do Porto (FEUP) em associação com a Metalgalva, tem em mãos um projeto - VHSSPOLES (referência 21518)[4] - que tem em vista a criação do primeiro banco de ensaios a nível nacional para este tipo de estruturas.

Na Fig.1.1 encontram-se apresentados dois casos distintos, ambos ocorridos no Brasil, ilustrando o colapso de torres autoportantes metálicas treliçadas de base quadrada.

### 1.3. OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

#### 1.3.1. OBJETIVOS

A necessidade de uma rápida e económica análise do escoamento do vento em torno deste tipo de estruturas, de forma a precaver acidentes desta natureza, faz com que a análise CFD seja cada vez mais solicitada. Assim, o objetivo desta dissertação é estudar o escoamento em torno de uma torre treliçada espacial, onde inicialmente serão estudados, isoladamente, os elementos que a constituem observando os fenómenos que ocorrem nas suas vizinhanças, para posteriormente se estudar o comportamento aerodinâmico do conjunto. No decorrer dos estudos aerodinâmicos serão realizadas análises

comparativas dos resultados obtidos pela análise CFD com as correntes normas em vigor, EN 1991-1-4 para a determinação da ação do vento e ensaios experimentais realizados noutras dissertações, de forma verificar a viabilidade de uma análise CFD para casos de estruturas treliçadas.

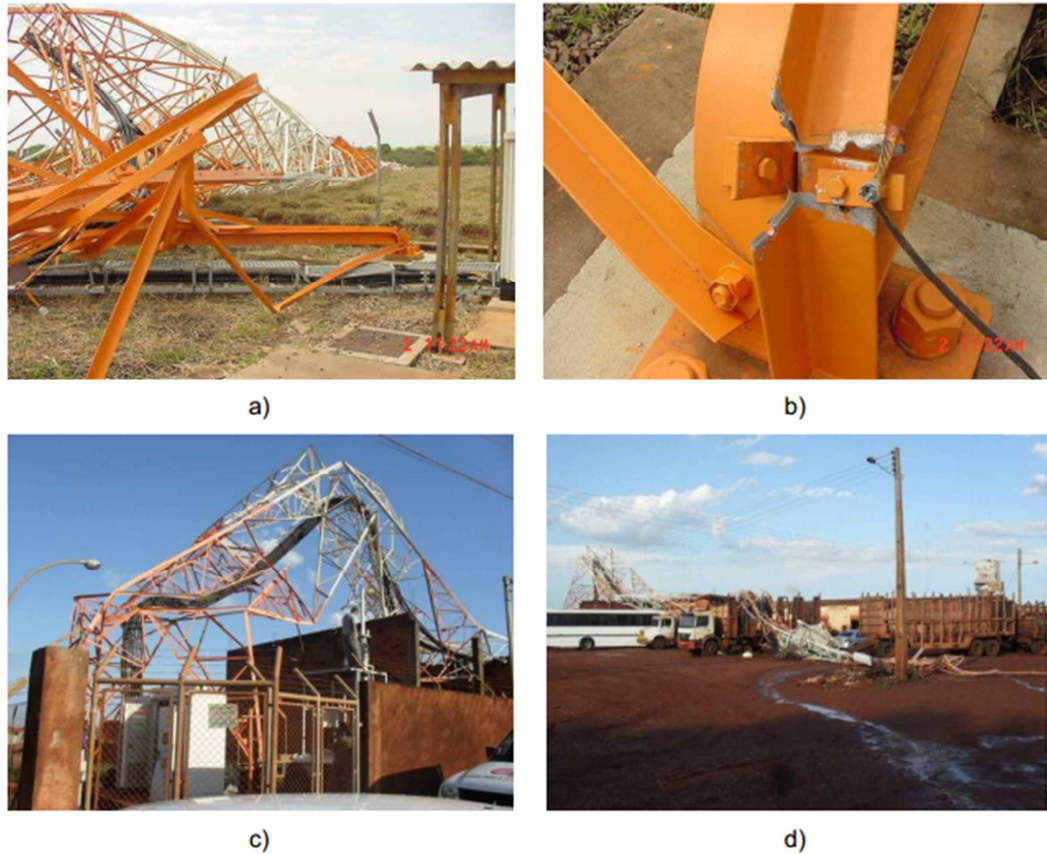


Fig.1.1 - Colapso de torres autoportantes metálicas treliçadas no Brasil[5].

### 1.3.2. Organização do trabalho

Este trabalho encontra-se organizado em 5 capítulos, cujos conteúdos se indicarão de seguida:

- Capítulo 1 - Introdução. Neste capítulo apresenta-se uma breve introdução ao tema em estudo e descreve-se o trabalho muito sucintamente.
- Capítulo 2 - Dinâmica de Fluidos Computacional. Neste capítulo são apresentados os conceitos teóricos que estão por detrás da Dinâmica de Fluidos Computacional, assim como uma pequena abordagem histórica do tema. Ainda neste capítulo é apresentada uma classe de modelos de turbulência, bem como aplicação do CFD na Engenharia do Vento.
- Capítulo 3 - Estudo Aerodinâmico de uma Secção Angulosa. Neste capítulo são apresentadas e descritas todas as regras da EN 1991-1-4 que são necessárias à análise de secções em cantoneira e serão realizadas análises CFD para várias disposições das cantoneiras onde será realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos pela análise CFD com correntes normas e resultados experimentais.

- Capítulo 4 - Estudo aerodinâmico de uma torre treliçada espacial segundo o Eurocódigo e CFD. Neste capítulo são apresentadas e descritas todas as regras da EN 1991-1-4 e da EN 1993-3-1 que são necessárias à análise de torres treliçadas e são apresentados resultados obtidos do estudo aerodinâmico que posteriormente são comparados com as correntes normas.
- Capítulo 5 – Conclusão e Trabalhos Futuros. Finalmente apresentam-se as principais conclusões do estudo efetuado bem como algumas indicações a ter em conta para trabalhos futuros.

# 2

## DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

### 2.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será introduzido o conceito de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), os princípios fundamentais que a regem assim como uma pequena abordagem histórica do tema. Dentro da temática CFD aborda-se uma das classes de modelos de turbulência, assim como vários tipos de malhas que se podem criar, ambos temas importantes quando se estuda um modelo computacional. Posteriormente à apresentação mais teórica do tema serão apresentados os campos de aplicação em que se insere assim como a sua importância na evolução da Engenharia do Vento.

### 2.2. PERSPETIVA HISTÓRICA DO CFD

A partir da década de 1960 a indústria aeroespacial integrou técnicas de CFD no projeto, pesquisa e desenvolvimento, e no fabrico de aeronaves e motores a jato. Mais recentemente, os métodos foram aplicados para a criação de motores de combustão interna, câmaras de combustão de turbinas a gás e fornos. Cada vez mais o CFD tem-se tornado num componente vital na conceção de produtos industriais e nos seus progressos.

O objetivo final dos desenvolvimentos no campo CFD é fornecer uma capacidade comparável com outras ferramentas CAE (engenharia assistida por computador), tais como os programas de cálculo automático de análise estrutural, isto é tornar o CFD numa ferramenta fidedigna na análise aerodinâmica de estruturas.

A evolução e disponibilidade de *hardware* de computação de alto desempenho a preço acessível e a introdução de interfaces de fácil utilização levaram a um recente aumento do interesse pelo CFD e assim entrar na comunidade industrial mais abrangente desde os anos 1990 [6].

### 2.3. O QUE É DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL?

A dinâmica de fluidos computacional, geralmente denominada como CFD, é a análise de sistemas envolvendo fluxo de fluidos, transferência de calor e fenómenos associados, tais como reações químicas por meio de simulação por computador [6].

Os aspetos físicos de qualquer fluxo de fluido são regidos por três princípios fundamentais e uma Equação Matemática:

- i. Princípio da Conservação da Massa
- ii. Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento
- iii. Equação de estado do fluido
- iv. Princípio da conservação da energia

Num grande número de aplicações é possível simplificar os problemas de dinâmica dos fluidos. Nos casos em a velocidade do escoamento sejam muito inferiores a Mach 1, razão entre a velocidade de escoamento e a velocidade do som, mais precisamente inferiores a 0.3, segundo [7], e visto ser o caso em estudo, então podemos considerar que o fluido é incompressível, logo não tem interesse a consideração da temperatura. Assim sendo, passam a ser três os princípios que regem o fluxo do fluido:

- i. Princípio da Conservação da Massa
- ii. Princípio da Conservação da Quantidade de Movimento
- iii. Princípio da conservação da energia

Estes princípios fundamentais podem ser expressos em termos de equações matemáticas, que geralmente tem a forma de equações diferenciais parciais [8]. No caso das equações de equilíbrio dinâmico, as equações que vamos estudar são as equações de Navier-Stokes.

Dinâmica de fluidos computacionais é, em parte, a arte de substituir equações diferenciais parciais, que regem o fluxo do fluido, em números, e avançando com estes números no espaço e/ou no tempo de forma a obter uma descrição numérica final do campo de interesse, completo, do fluxo.

## 2.4. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS QUE REGEM O MOVIMENTO DO FLUIDO

### 2.4.1. EQUAÇÃO DE CONTINUIDADE

Matéria não pode ser criada nem destruída. O aumento da massa dentro do volume de controlo é igual à massa de entrada menos a massa de saída através da superfície de controlo [9]. Matematicamente expressa-se da seguinte forma.

$$\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \int_S (\rho) \vec{v} \cdot \vec{n} dA = 0 \quad (2.1)$$

Onde,

- $\rho$  Massa Volúmica;
- $\vec{v}$  Vetor velocidade do fluido em qualquer ponto da secção em coordenadas de Euler;
- $\vec{n}$  Vetor normal do fluido;
- $dV$  Derivada em função do volume;
- $dA$  Derivada em função da área de superfície.

### 2.4.2. EQUAÇÕES DE EQUILÍBRIO DINÂMICO

O vetor soma de todas as forças externas que atuam no volume de controlo é igual à soma total da taxa de variação do momento de massa dentro do volume de controlo e da taxa de variação do momento de escoamento dentro da superfície de controlo [9]. Matematicamente expressa-se da seguinte forma.

$$\int_V \frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} dV + \int_S (\rho \vec{v}) \vec{v} \cdot \vec{n} dA = \vec{F} \quad (2.2)$$

Onde,

$(\rho \vec{v})$  Momento da densidade de fluxo;  
 $\vec{F}$  Vetor soma de todas as forças externas, incluindo o peso próprio.

#### 2.4.3. PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

A taxa de calor adicionada ao volume de controlo menos a taxa de trabalho que é realizado no eixo ou pelo volume de controlo é igual à taxa de variação de energia no interior do volume de controlo e o fluxo resultante de trabalho e do fluxo de energia através da superfície do controlo [9]. Matematicamente expressa-se da seguinte forma.

$$\int_V \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} dV + \int_S \rho(e + p v) \vec{v} \cdot \vec{n} dA = \frac{dQ}{dt} - \frac{dW_s}{dt} \quad (2.3)$$

Onde,

$e = \frac{\vec{v}^2}{2} + gz + e_i$	Energia total por unidade de massa;
$e_i$	Energia interna por unidade de massa;
$\frac{1}{2} \vec{v}^2$	Energia cinética por unidade de massa;
$gz$	Energia potencial por unidade de massa;
$p$	Pressão;
$v = \frac{1}{\rho}$	Volume específico (valor por unidade de massa);
$p v$	Trabalho do fluxo, caso exista diferença de pressão;
$Q$	Calor adicionado ao volume de controlo;
$W_s$	Trabalho que é realizado no volume de controlo.

#### 2.4.4. EQUAÇÕES DE NAVIER-STOKES

As mais familiares equações de movimento para um fluido incompressível, caso em estudo, são as equações de Navier-Stokes [9], que se expressam da seguinte forma.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.6)$$

Onde,

u, v, w      Componentes da velocidade instantânea no ponto segundo as direções  
x, y, z.

Aqui assumimos: que é um fluido Newtoniano, ou seja, é um fluido em que cada componente a tensão de corte é proporcional ao gradiente de velocidade na direção normal a essa componente, como é o caso da água e do ar; a viscosidade,  $\mu$ , é constante; e a componente da força gravítica, peso próprio, foi incorporada dentro da pressão, p e na direção correspondente.

## 2.5. MODELOS DE TURBULÊNCIA

Turbulência é o estado de movimento do fluido que se caracteriza por vorticidade tridimensional aparentemente aleatória e caótica. Quando a turbulência está presente, isto é, normalmente para números de Reynolds superiores a 2500, geralmente domina todos os outros fenómenos de fluxo e resulta em aumento de dissipação de energia, de mistura, transferência de calor, e arraste [10, 11].

A simulação direta da turbulência, usando a equação de Navier-Stokes, mesmo com o recurso dos computadores que dispomos atualmente, é aplicável apenas para escoamentos simples e com números de Reynolds relativamente baixos, inferiores a  $10^4 - 10^5$  [11].

A utilização numérica direta é dificultada pelo facto de ter de ser criada uma malha de elevados volumes finitos, visto que: a dissipação viscosa é de pequena escala; a turbulência é um fenómeno de pequena escala espacial e de elevada frequência, o que envolve muito tempo de computação. Assim sendo, a turbulência tem de ser encarada de uma forma aproximada [12].

Existem cinco classes principais de modelos de turbulência:

- i.     algébricos;
- ii.   com uma equação;
- iii.   com duas equações;
- iv.   equações de segunda ordem;
- v.     Large-Eddy Simulation.

O modelo que vamos abordar neste capítulo é um modelo baseado na metodologia k- $\epsilon$ , modelo que será usado nas modelações do próximo capítulo, que pertence à classe de modelos com duas equações, designado por RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). É uma modelo que resolve as equações de Navier-Stokes de uma forma estatística e é baseado nas equações de transporte para a energia cinética (k) e taxa de dissipação ( $\epsilon$ ) da turbulência e é usado para praticamente todos os casos de escoamentos, por ser robusto, de relativa rapidez de resolução e precisão em casos com uma grande variação do número de Reynolds.



Nas secções seguintes são apresentados os modelos de turbulência do tipo k-ε, segundo o guia teórico do *Ansys Fluent* [10], excluindo assim a introdução de referências nesses subcapítulos.

### 2.5.1. STANDARD K - ε

Os parâmetros k, energia cinética da turbulência, e ε, taxa de dissipação, são calculados da seguinte forma.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.8)$$

Onde,

$G_k$	Parâmetro associado à geração da energia cinética da turbulência devido a gradientes da velocidade média;
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$	Constantes;
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	Números de Prandtl turbulentos para k e ε, respetivamente.

As equações (2.7) e (2.8) não contem os parâmetros correspondente à impulsão, visto que o fluido em estudo, ar, não exerce forças impulsivas.

A viscosidade turbulenta,  $\mu_t$ , é calculada combinando k e ε na seguinte equação,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.9)$$

Onde,  $C_\mu$  é uma constante empírica, cujo valor médio, aproximadamente de 0,09, foi determinado experimentalmente em regiões de escoamentos turbulentos onde se verificou equilíbrio entre a produção e dissipação de energia turbulenta [13].

Com base em extensos estudos em escoamentos turbulentos, os valores usados para as constantes das equações deste modelo são os seguintes,

$$C_{1\varepsilon} = 1,44; C_{2\varepsilon} = 1,92; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3$$

### 2.5.2. RNG k - ε

O modelo RNG k-ε foi obtido usando uma técnica estatística chamada teoria da renormalização em grupo – RNG. É muito semelhante ao modelo Standard k-ε, mas inclui aperfeiçoamentos que aumentam a precisão no tratamento da turbulência em escoamentos com recirculação, adicionando um

termo à equação de transporte de  $\varepsilon$  que permite melhorar a sua precisão e fornece uma equação derivada analiticamente para a viscosidade que tem em consideração escoamentos com número de Reynolds baixo. Estes melhoramentos permitem ao modelo ser mais fidedigno e preciso para uma variedade maior de escoamentos comparativamente com o modelo Standard k- $\varepsilon$ .

As equações de transporte do modelo RNG k- $\varepsilon$  têm uma forma similar às do modelo Standard e apresentam-se da seguinte forma.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.11)$$

Onde,

$\alpha_k, \alpha_\varepsilon$  são números de Prandtl inversos efetivos para k e  $\varepsilon$  respetivamente, e apresentam aproximadamente o mesmo valor de 1,393.

As equações (2.10) e (2.11) não contem os parâmetros correspondente à impulsão, visto que o fluido em estudo, ar, não exerce forças impulsivas.

Para o calculo da viscosidade turbulenta o modelo RNG k- $\varepsilon$  utiliza a seguinte equação diferencial,

$$d \left( \frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \right) = 1,72 \frac{\hat{v}}{\sqrt{\hat{v} - 1 + C_v}} d\hat{v} \quad (2.12)$$

Onde,

$$\hat{v} = \frac{\mu_{eff}}{\mu}$$

$$C_v \approx 100$$

A equação (2.12) é integrada para se obter uma descrição mais precisa de como a viscosidade turbulenta efetiva varia com o número de Reynolds, permitindo uma melhor simulação de escoamentos com um número de Reynolds baixo.

Para casos em que o numero de Reynolds for elevado a equação (2.12) pode ser simplificada para a seguinte forma,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.13)$$

Onde,

$$C_\mu = 0.0845, \text{ Obtido através da teoria do RNG.}$$

Nota-se que o valor de  $C_\mu$  é muito próximo do valor obtido através do método empírico do modelo Standard.

As constantes  $C_{1\varepsilon}$  e  $C_{2\varepsilon}$  são obtidas analiticamente pela teoria do RNG e tomam os valores de 1,42 e 1,68 prospectivamente, valores usados por defeito pelo *ANSYS Fluent*.

O modelo RNG é mais sensível a variações rápidas de velocidade e à otimização de curvaturas nas malhas de elementos finitos, do que o modelo Standard k- $\varepsilon$ , o que explica um desempenho superior do modelo RNG para certas classes de fluxos.

### 2.5.3. REALIZABLE K - $\varepsilon$

O modelo Realizable k- $\varepsilon$  difere do modelo Standard k- $\varepsilon$  de duas formas:

- i. Contém uma nova formulação para a viscosidade turbulenta, de acordo com a equação (2.17);
- ii. Possui uma nova equação de transporte para a taxa de dissipação,  $\varepsilon$ .

A designação de Realizable significa que o modelo satisfaz certas restrições matemáticas para as tensões de Reynolds, consistentes com o comportamento físico dos escoamentos turbulentos. Nem no modelo Standard k- $\varepsilon$  nem no modelo RNG k- $\varepsilon$  é realizável.

Tanto o Realizable como RNG k- $\varepsilon$  tem mostrado melhorias substanciais relativamente ao modelo Standard k- $\varepsilon$ , onde as características do escoamento incluem uma forte curvatura aerodinâmica, vórtices e rotações. Uma vez que o modelo é relativamente novo, não está claro em que casos, exatamente, o modelo Realizable k- $\varepsilon$  supera de uma forma consistente o modelo RNG. No entanto, estudos recentes têm mostrado que o modelo Realizable oferece a melhor performance de todas as versões dos modelos k- $\varepsilon$  para varias validações de escoamentos separados e escoamentos com características complexas de escoamentos secundários.

Uma das limitações é que o modelo Realizable k- $\varepsilon$  produz uma viscosidade turbulenta numérica em situações quando o domínio computacional contém tanto em zonas de fluido rotacional como em zonas de fluido estacionário. As equações de transporte para o modelo Realizable k- $\varepsilon$  são,

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) + \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) + \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \quad (2.15)$$

A viscosidade turbulenta, como nos outros modelos k- $\varepsilon$ , toma a seguinte forma,

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.16)$$

A diferença entre o modelo Realizable e os modelos Standard e RNG é que o parâmetro  $C_\mu$  deixa de ser constante e passa a ser determinado por uma equação, (2.17), em função de  $k$ ,  $\varepsilon$  e por um fator,  $U^*$ , que tem em conta a velocidade de rotação e tensão média.

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (2.17)$$

O valor das constantes  $C_2$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  tomam os valores de 1,9; 1,0 e 1,2 respectivamente.

## 2.6. MÉTODO DE DISCRETIZAÇÃO

As equações analíticas de Navier-Stokes são agora designadas de RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes), mais fáceis de as resolver numericamente. Mas se as pretendemos resolver através de um método computacional temos que as transformar numa forma discreta. É aqui que se introduz o processo de discretização [14].

O ponto de partida de qualquer método numérico é o modelo matemático, por exemplo, um conjunto de equações diferenciais parciais e condições de fronteira que regem o processo. A escolha de um modelo apropriado para a aplicação alvo pode conter simplificações das regras de conservação exatas.

Contudo a seleção das simplificações a efetuar e a relaxação de determinadas restrições, requer um conhecimento aprofundado do problema em causa, de forma a evitar cometer erros graves. Um método numérico normalmente é desenvolvido para encontrar uma solução aproximada de um conjunto particular de equações, uma vez que é impraticável criar um método de resolução que seja aplicável em todas as situações.

Depois de selecionado o modelo matemático, tem de se escolher um método de discretização apropriado, isto é, um método de aproximar as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas para as variáveis do problema que serão obtidas em localizações discretas no espaço e no tempo.

Existem vários métodos sendo os mais conhecidos:

- i. Método das Diferenças Finitas;
- ii. Método dos Volumes Finitos;
- iii. Método dos Elementos Finitos.

Todos os tipos de métodos produzem o mesmo resultado se a malha utilizada for suficientemente boa, contudo, alguns métodos são mais apropriados para determinadas classes de problemas do que outros [14]. O método que vamos abordar é o método dos volumes finitos, método usado pelo ANSYS FLUENT.

### 2.6.1. MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS

O método dos volumes finitos utiliza como ponto de partida a forma integral da equação da conservação. O domínio de solução é dividido num número finito de volumes de controlo contíguos, e a equação da conservação é aplicada a cada volume de controlo.

No centróide de cada volume de controlo localiza-se um nó computacional, no qual são calculados os valores das variáveis, sendo os valores das variáveis nas superfícies do volume de controlo obtidos por interpolação em função dos valores nodais (centro do volume de controlo). Os integrais de volume e de superfície são aproximados usando fórmulas de quadratura apropriadas.

Como resultado, obtém-se uma equação algébrica para cada volume de controlo, na qual aparecem os valores das variáveis no nó em causa e nos nós vizinhos. O método dos volumes finitos pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, por isso adapta-se a geometrias complexas. A malha define apenas as fronteiras do volume de controlo e não necessita estar relacionada com um sistema de coordenadas.

O método é inerentemente conservativo, contando que os integrais de superfície (que representam fluxos convectivos e difusivos) sejam os mesmos em faces partilhadas por volumes de controlo.

A discretização das equações fundamentais pode ser ilustrada ao considerar a equação de conservação de transporte de quantidade escalar geral  $\phi$  que se segue, (apresentada na forma integral sobre um volume de controlo[14])

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (2.18)$$

Onde,

- $\rho$  Densidade;
- $\vec{v}$  Vetor velocidade;
- $\vec{A}$  Vetor da área de superfície, tal que  $d\vec{A} \rightarrow \vec{n} dA$  ;
- $\Gamma_\phi$  Coeficiente de difusão de  $\phi$ ;
- $\nabla \phi$  Gradiente de  $\phi$ ;
- $S_\phi$  Quantidade de  $\phi$  gerado por unidade de volume.

Aplicando a discretização na equação anterior, toma a seguinte forma,

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_f} \rho_f \phi_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N_f} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (2.19)$$

Onde,

- $N_f$  Número de faces da célula;
- $\phi_f$  O valor de  $\phi$  trocado por convecção pela face;
- $\rho_f \vec{v}_f \cdot \vec{A}_f$  Fluxo mássico pela face;
- $\vec{A}_f$  Área da face, tal que  $d\vec{A}_f \rightarrow \vec{n} dA_f$ ;
- $V$  Volume da célula.

A equação discretizada contém a variável escalar não conhecida,  $\phi$ , no centro da célula, assim como as incógnitas das células adjacentes. A equação será, em geral, não linear no que toca a essas variáveis. Uma forma linearizada da equação pode ser dada da seguinte forma,

$$a_p \phi = \sum_{adj.} a_{adj.} \phi_{adj.} + b \quad (2.20)$$

Onde, a referência, adj., é alusiva à célula adjacente e os parâmetros  $a_p$  e  $a_{adj.}$  são coeficientes linearizados de  $\phi$  e de  $\phi_{adj.}$ , respetivamente.

Comparativamente com o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos na abordagem da discretização das equações de Navier-Stokes em que temos que controlar manualmente a conservação da massa, energia e quantidade de movimento, no método dos volumes finitos, podemos facilmente descobrir que se as equações de Navier-Stokes forem satisfeitas em cada volume de controlo, são automaticamente satisfeitas para todo o domínio. Ou seja, se a conservação for satisfeita em cada volume de controlo, automaticamente será satisfeita em todo o seu domínio [15].

Esta é a razão pela qual o método dos volumes finitos é preferido, e mais usual na Dinâmica de Fluidos Computacional.

## 2.7. MALHAS

Existem três tipos de construção de malhas:

- i. Malhas estruturadas
- ii. Malhas não estruturadas
- iii. Malhas estruturadas em bloco

Dos três tipos, a mais simples é a estruturada, Fig.2.1, porque todos os nós deste tipo de malhas tem o mesmo número de elementos na sua envolvente. É uma malha em que a podemos descrever e armazenar facilmente. Mas este tipo de construção de malhas serve só para domínios simples, se tivermos um domínio mais complexo, podemos usar um tipo de construção de malhas não estruturadas, Fig.2.2. Um exemplo de utilização deste tipo de malhas é em perfis aerodinâmicos. A estrutura de um perfil aerodinâmico é bastante complexa. O escoamento na proximidade do objeto é muito importante e complexo, o que leva a que nessas zonas dever-se-á ter uma malha mais refinada. Fora da proximidade do objeto o escoamento é comparativamente simples, logo não existe a necessidade de usar uma malha tão refinada.

Geralmente, as malhas não estruturadas são adequadas a qualquer tipo de geometrias. É dos tipos de malhas mais populares dentro do CFD. A desvantagem deste tipo é que apresenta uma base de dados tipologicamente irregular, o que torna os resultados mais difíceis de descrever e armazenar [15].

As malhas tipologicamente bem estruturadas por blocos são um arranjo das malhas estruturadas e não estruturadas. A ideia é primeiro dividir o domínio em vários blocos e depois usar diferentes malhas nos diferentes blocos, Fig.2.3.

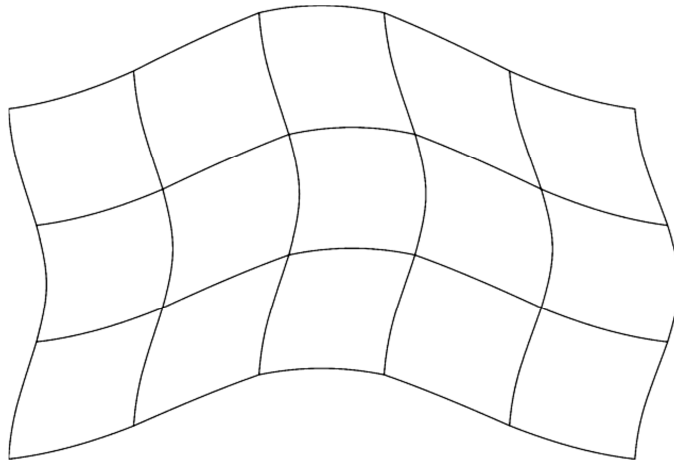


Fig.2.1 – Malha Estruturada[15]

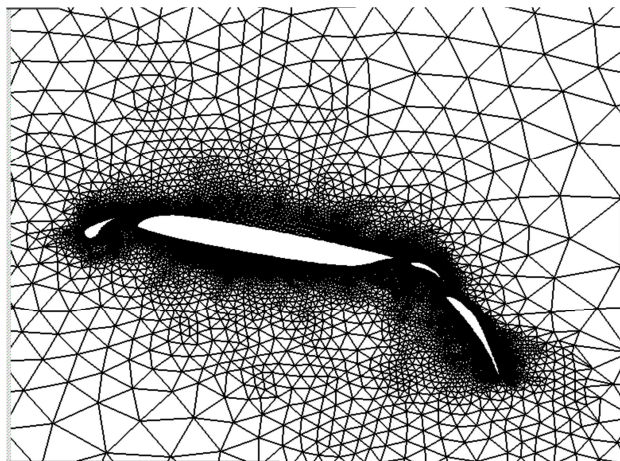


Fig.2.2 – Malha Não Estruturada[15]

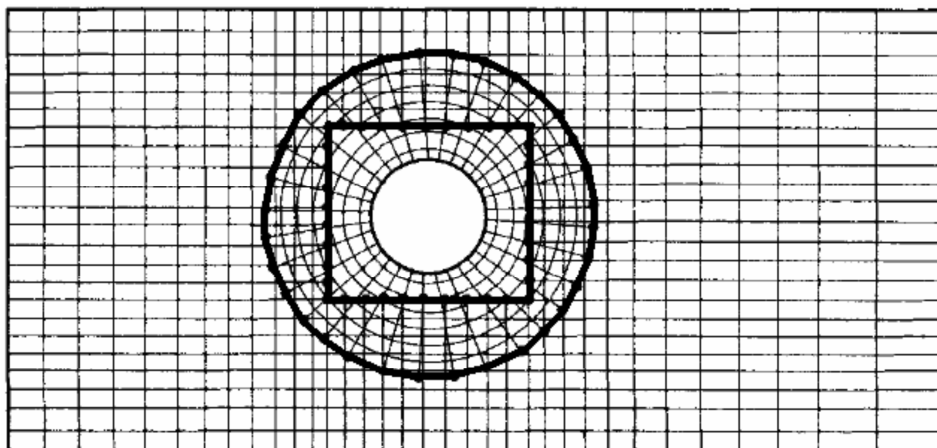


Fig.2.3 – Malha estruturada por blocos com sobreposição[14]

## 2.8. CAMPO DE APLICAÇÃO DO CFD E SUA IMPORTÂNCIA

A técnica é muito poderosa e abrange um alargado leque de áreas de aplicação industrial e não industrial [6]. Alguns exemplos da sua aplicação são:

- **Aerodinâmica de aeronaves e veículos:** estudo das forças de sustentação e arrasto;
- **Hidrodinâmica de navios:** estudo da interação fluido (água) com o casco do navio;
- **Centrais elétricas:** estudo da combustão em motores de combustão interna e turbinas de gás;
- **Turbomáquinas:** estudo de fluxos nas passagens interiores de rotação, difusores, etc;
- **Engenharia elétrica e eletrônica:** estudo do arrefecimento de equipamentos incluindo microcircuitos;
- **Engenharia de processos químicos:** estudo de misturas e separação, e na modelagem de polímeros;
- **Ambiente externo e interno de edifícios:** estudos da ação do vento e aquecimento/ventilação;
- **Engenharia naval:** estudo das cargas em estruturas *offshore*;
- **Engenharia ambiental:** estudo da distribuição de poluentes e efluentes;
- **Hidrologia e oceanografia:** estudo dos fluxos de rios, estuários e oceanos;
- **Meteorologia:** Estudo da Previsão do Tempo;
- **Engenharia Biomédica:** estudo do fluxo do sangue através de artérias e veias,
- **Engenharia Civil:** estudo do fluxo do vento num tabuleiro de uma ponta rodoviária, estudo do escoamento em torno de pilares, estudos de engenharia portuária, etc.

Relativamente à sua importância existem três métodos de estudo para análise de fluidos: os analíticos, os experimentais e os numéricos, o caso do CFD. Como um novo método, o CFD tem varias vantagens comparando com os métodos experimentais [15], como se pode observar no Quadro 2.1.

Quadro 2.1- Comparação do método experimental com o CFD

	Simulação (CFD)	Experimental
Custo	Barato	Caro
Tempo	Curto	Longo
Escala	Qualquer	Pequena/Média
Informação	Toda	Limitado
Repetição	Sempre	Às vezes
Segurança	Sim	Algum Perigo

## 2.9. PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO DO CFD

O processo de desenvolvimento do CFD parte inicialmente de um problema causado por um fluido que pretendemos resolver, e para o resolver devemos conhecer as suas propriedades físicas, e para isso usamos a Mecânica de Fluidos.



Como forma de descrever as propriedades físicas do fluido podemos usar equações matemáticas, isto é, as equações de Navier-Stokes, equações que regem o CFD. Como as equações de Navier-Stokes são equações analíticas de resolução possível para situações simples de escoamentos, torna-se necessário uma resolução computacional de modelos através de uma forma discretizada. A tradução é feita através de métodos de discretização numérica, tais como diferenças finitas, elementos finitos e método dos volumes finitos. Consequentemente, precisamos de dividir todo o domínio do problema em muitas partes pequenas, porque são nelas que se baseia a discretização.

Assim, podemos escrever programas para as resolver. Tipicamente as linguagens usadas são a Fortran e C. Normalmente os programas são corridos em supercomputadores ou estações de trabalho. No final, podemos obter os resultados da nossa simulação. Podendo assim comparar e analisar os resultados da simulação com resultados experimentais e resultados de problemas reais.

Se os resultados não forem suficientes para resolver os problemas, podemos repetir o processo várias vezes até atingir uma solução que nos satisfaça [15]. Este processo pode ser representado na forma de um fluxograma, apresentado na Fig.2.4.

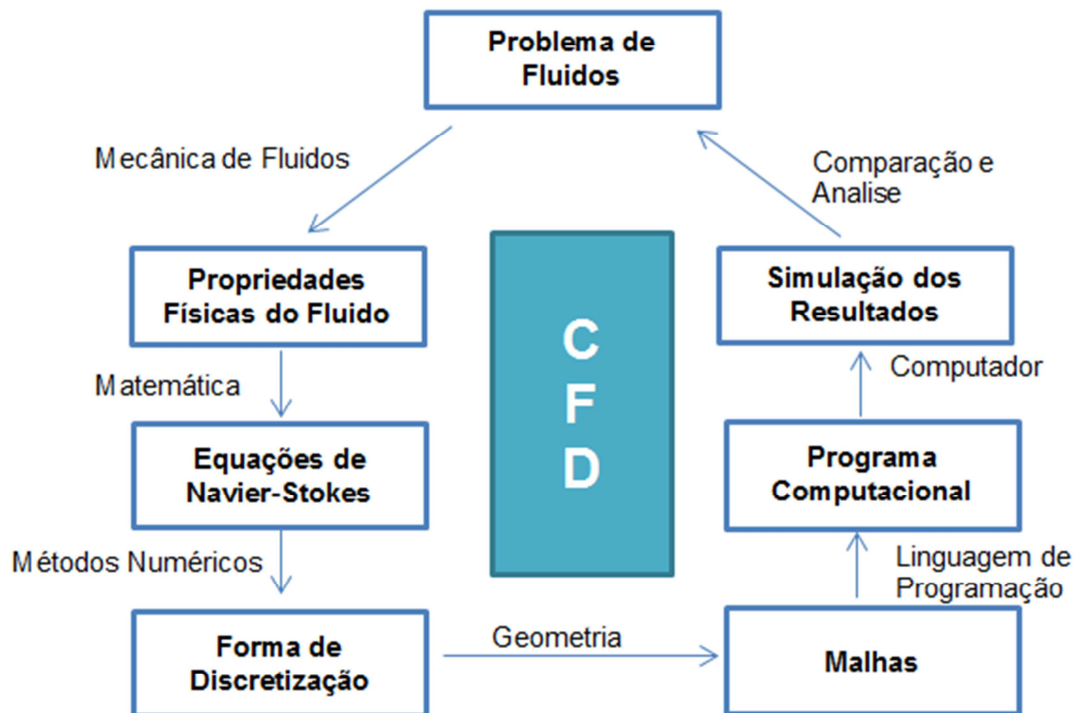


Fig.2.4 – Processo de desenvolvimento do CFD

## 2.10. APLICAÇÃO DO CFD À ENGENHARIA DO VENTO

Engenharia Computacional do Vento, ou usualmente designada por CWE, (Computational Wind Engineering) implica, principalmente, a aplicação de CFD para resolver problemas de engenharia do vento. A parte estrutural do CWE geralmente envolve a combinação de problemas aerodinâmicos em corpos não-fuselados, ou como se designa na língua inglesa *bluff bodies*, afluência de turbulência, rasto de turbulência, construção da malha e número alto Reynolds (até à ordem de  $10^7$ - $10^8$ ).

Todos estes problemas requerem atenção especial na simulação numérica. De acordo com [16], a engenharia do computacional do vento melhorou em uma fase em que,

- i. É conveniente quando se considera a influência da afluência de turbulência;
- ii. Melhoria do modelo de turbulência que nos permitiu compreender como tratar o fluxo separado complicado e fluxo turbulento com forte vorticidade;
- iii. Melhoria da técnica computacional usando o sistema de coordenadas curvilíneo generalizado que permitiu calcular as forças aerodinâmicas sobre estruturas com formas complicadas em termos de geometria do corpo. A precisão da simulação é melhorada.

Estas melhorias permitem a simulação da pressão do vento, da força do vento e da resposta do vento em estruturas com formas relativamente complexas imersas em camadas limite com características semelhantes às de vento natural. Quando estas técnicas são adequadamente utilizadas, o CFD pode ser aplicado a alguns problemas práticos de engenharia.

O CFD demonstrou ser muito poderoso na previsão das representações do vento em áreas de alta densidade de construção de arranha-céus, em áreas de terrenos com diferentes inclinações e na estimativa das modificações de fluxos do vento devido a variações topográficas e efeitos da rugosidade urbana, tempestades e tornados [12].

A viabilidade de CFD em simular a distribuição da pressão em torno de um edifício baixo e de um arranha-céus imerso numa parede áspera dentro do limite da camada turbulenta, também tem sido apresentada [12].

O CFD também tem sido utilizado na realização dos seguintes estudos:

- No escoamento tridimensional em torno de um cilindro retangular de oscilações instáveis foi investigado numericamente;[12]
- No escoamento em torno de uma secção retangular, Fig.2.5, através de simulações com o *ANSYS-Fluent* usando três métodos de turbulência de forma a obter um resultado mais próximo de resultados experimentais;[11]

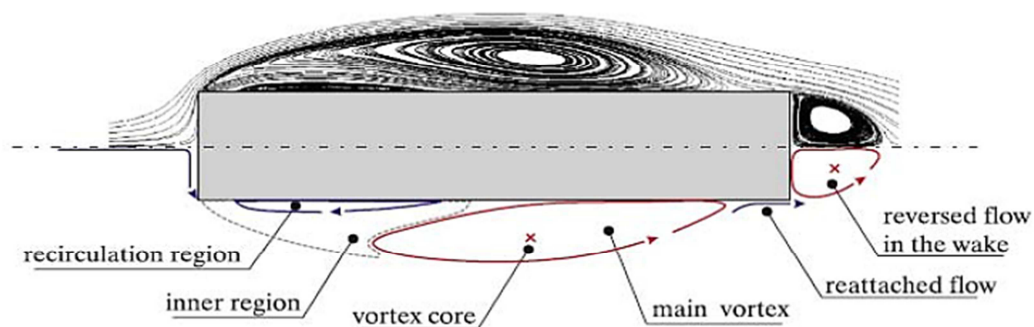


Fig.2.5 - Representação do escoamento, padrão, esperado em torno de um retângulo, adaptado de [11]

Álvaro

- No estudo do escoamento em torno da ponte da *Grande Ravine*, Fig.2.6, na ilha Reunião situada no Oceano Índico. Além dos resultados obtidos no local, foram realizados, no âmbito do Programa doutoral de Engenharia Civil da Faculdade de

Engenharia da Universidade do Porto por [17], testes em túnel de vento com um modelo à escala, e simulações computacionais com o *software ANSYS CFX* [18];

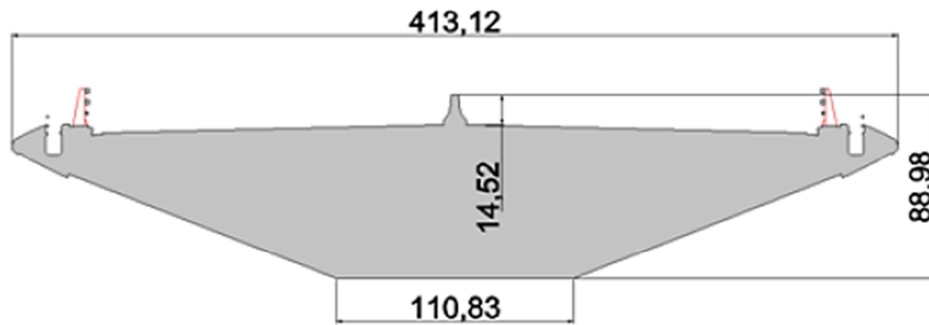


Fig.2.6 - Secção da Ponte da Grande Ravine e suas medidas principais (mm)[11]

- No estudo das oscilações da água em tanque retangular, Fig.2.7, em que foi efetuada uma simulação computacional do fenómeno da água no interior de um tanque rígido de base retangular sujeito a movimentos horizontais sinusoidais e de origem sísmica, e a sua comparação com resultados experimentais, onde se revelou que a simulação computacional através do *ANSYS-Fluent* é uma boa ferramenta para previsão do movimento do fluido no interior de um tanque excitado dinamicamente, de modo a poderem-se prever os esforços provocados pela ondulação nas paredes dos tanques [18, 19].

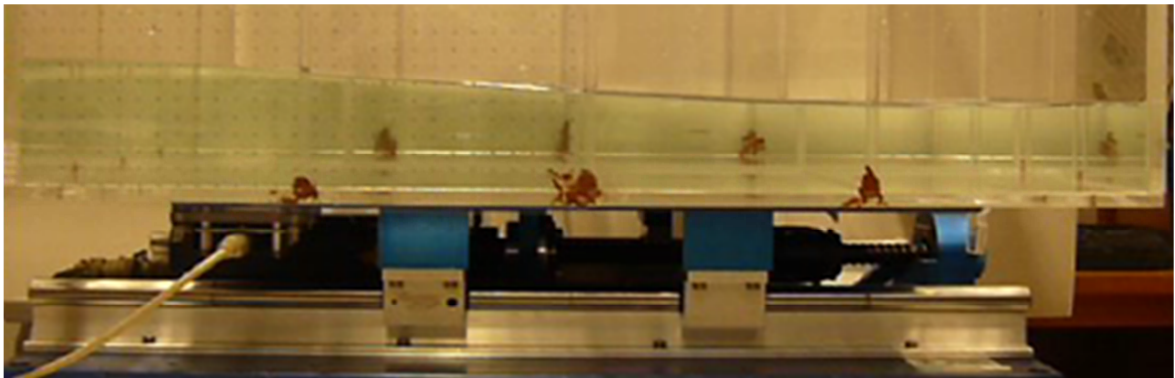


Fig.2.7 - Tanque e mesa sísmica durante as oscilações da superfície livre ou sloshing [18, 19]

Estas simulações mostraram que o CFD pode ser utilizado para resolver alguns problemas práticos de resistência ao vento. No entanto, quando se utiliza o CFD como instrumento geral para a previsão de cargas de vento em estruturas, temos de perceber que, devido às diferenças nos métodos de discretização, condições de fronteira, modelagem da turbulência e procedimentos numéricos, os diferentes resultados da simulação são inevitáveis.

Portanto, é necessário compreender os fundamentos da simulação numérica, a fim de tornar a simulação mais fiável e robusta. A realidade é que, apesar do CFD ter sido amplamente utilizado e o seu uso permitido na resolução de problemas de vento em geral, tais como o vento médio, poluição do

ar e outros, ainda é apenas um método em fase de validação, quando é utilizado para o cálculo da força do vento, porque não foi adequadamente validado até agora.

Embora ambas as abordagens experimentais e numéricas estejam disponíveis para investigar fenômenos de escoamento, as suas performances no estudo de escoamento são diferentes.

Ferramentas experimentais, como túnel de vento e canal de água são métodos tradicionais para o estudo de fenômenos de escoamentos reais, utilizando um modelo à escala reduzido. Nas décadas de 60's e 70's o conhecimento atual sobre dinâmica de fluidos era obtido principalmente a partir de estudos experimentais e analíticos.

CFD pode fornecer informação temporal e espacial das quantidades de fluxo que permite perceber o campo de fluxo através de visualizações digitais, o que normalmente é muito difícil visualizar num método experimental. CFD foi antecipado como alternativa, não só suplementar, ao túnel de vento para o estudo de problemas práticos de resistência ao vento. No entanto, infelizmente, o CFD não está completamente estabelecido como um método experimental, embora constitua uma ferramenta numérica muito válida, aferida, comprovada e calibrada com resultados obtidos em estações ou unidades de observação.

No campo da engenharia estrutural do vento, todas as normas nacionais de ações do vento são formuladas sob a premissa de que as ações do vento em estruturas são simuladas em túneis de vento. A representação da velocidade do vento é ainda apenas classificada em algumas categorias, a fim de tornar mais fácil a realização de ensaios no túnel de vento. Com a abordagem do CFD, é possível prever a representação da velocidade do vento no local da obra e, conseqüentemente simular a ação do vento sobre a estrutura, numericamente.

Podemos antecipar que a melhoria do CFD vai trazer uma revolução às normas de projeto de resistência do vento.

# 3

## ESTUDO AERODINÂMICO DE PERFIS DE SECÇÃO ANGULOSA

### 3.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os conceitos de coeficiente de arrasto e sustentação e será estudado o escoamento em torno de perfis de secção angulosa, para vários tipos de regimes turbulentos e varias disposições da secção. O estudo será realizado em 2D através de uma análise computacional, CFD, no *ANSYS Fluent* e resultará na determinação do coeficiente de arrasto para posteriormente ser comparado/validado por várias normas, tais como a EN 1991-1-4 [20], EN 1993-3-1 [21] e Britânica (British Standard) [22], e por estudos experimentais já realizados em outras dissertações [2].

### 3.2. AERODINÂMICA EM CORPOS NÃO-FUSELADOS

As características aerodinâmicas de corpos não-fuselados diferem substancialmente dos corpos aerodinâmicos, e compreender a aerodinâmica de corpos não-fuselados é essencial para o progresso da compreensão da engenharia do vento [12]. Corpos aerodinâmicos como as asas dos aviões que têm a borda frontal das asas arredondadas, um perfil fino e a borda traseira afiada, apresentam pequenos rastros de vórtices para pequenos ângulos de ataque e onde a força de sustentação é consideravelmente superior à força de arrasto.

Por outro lado, os corpos não-fuselados provocam um largo e separado rasto de vórtices, com escoamentos turbulentos, onde a força de arrasto é comparável com a de sustentação. É necessário compreender o tamanho e a natureza destas forças de forma a assegurar que os projetos de engenharia são adequados à sua finalidade, resistir à ação do vento.

### 3.3. FORÇAS DE ARRASTO E SUSTENTAÇÃO

Um qualquer corpo, qualquer que seja a sua forma, quando imerso num escoamento vai estar sujeito a forças devido à ação do fluido sobre o corpo. No caso das seções angulosas, visto não apresentarem uma geometria aerodinâmica, é importante o estudo destas forças, sendo as forças de arrasto as mais significantes.

A força exercida no corpo ao longo da direção do escoamento é chamada de força de arrasto aerodinâmico,  $F_D$ . A força de arrasto, denominada na língua inglesa de *drag*, é basicamente uma força que ocorre sempre que um corpo se move ou, neste caso ofereça resistência contra o escoamento em que está inserido.

Outra força importante a considerar quando se estudam corpos imersos é a força perpendicular à força de arrasto, que em certas aplicações tem um papel tão importante como proporcionar sustentação a um avião.

Esta força é chamada de força de sustentação,  $F_L$ , ou *lift* como é designada na língua inglesa.

### 3.4. COEFICIENTE DE ARRASTO E DE SUSTENTAÇÃO

Coeficiente de arrasto, como é a sua designação usual obtida a partir da tradução direta da língua inglesa de *drag coefficient*, ou, como é apresentado nos Eurocódigos, coeficiente de força é um parâmetro adimensional que é usado para quantificar o arrasto ou resistência de um objeto na direção do escoamento.

A sua quantificação depende da força, determinada de uma forma numérica, experimental ou computacional, da densidade do fluido, da velocidade do escoamento e da área de referência, área de contacto ou exposta na direção do fluido. Numericamente é determinado pela seguinte equação,

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_{ref}} \quad (3.1)$$

Coeficiente de sustentação, designação obtida diretamente da tradução do inglês de *lift coefficient*, é um parâmetro adimensional que demonstra a capacidade que tem um determinado perfil de gerar sustentação. É um parâmetro não tão importante para o caso em estudo como é o coeficiente de arrasto, mas tem bastante importância no cálculo da força de sustentação das asas de uma aeronave, quanto maior for este parâmetro melhor será a sua sustentação.

A sua quantificação depende, como demonstra a seguinte equação, da força de sustentação, da área do objeto, da velocidade do escoamento e da massa volúmica do fluido. Além destes parâmetros, na quantificação do coeficiente é necessário ter atenção ao ângulo de incidência [12].

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A_{ref}} \quad (3.2)$$

### 3.5. COEFICIENTE DE ARRASTO SEGUNDO O EUROCÓDIGO 1

Neste subcapítulo e de forma a manter a designação usada pelo Eurocódigo [20], adotar-se-á a designação de coeficiente de força ao invés de coeficiente de arrasto.

A EN 1991-1-4 [20] fornece orientações relativamente à determinação das ações do vento natural para o projeto de diversos tipos de construções.

De entre as situações abrangidas por esta norma, referem-se as seguintes:

- Construções com altura até 200 m;
- Mastros espiados, torres em treliça e postes de iluminação;
- Pontes suspensas, de tirantes ou com tramo(s) de vão inferior a 200 m;

- Vibrações de torção ou em que seja necessário considerar outros modos de vibração para além do modo fundamental.

### 3.5.1. FORÇAS EXERCIDAS PELO VENTO

As ações do vento sobre as construções são representadas por um conjunto simplificado de pressões ou de forças estáticas cujos efeitos são equivalentes aos efeitos extremos do vento, tendo em conta a turbulência atmosférica<sup>1</sup>. Salvo especificação em contrário, as ações do vento devem ser classificadas como ações de variáveis fixas<sup>2</sup>.

As forças exercidas pelo vento ( $\mathbf{F}_w$ ) podem ser determinadas por uma de duas vias:

- A partir das pressões nas superfícies;
- A partir de coeficientes de força apropriados.

Neste subcapítulo só vamos abordar a determinação dos coeficientes de força para secções planas.

### 3.5.2. ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE SECÇÃO RETANGULAR

O coeficiente de força,  $c_f$ , para elementos estruturais de seção retangular, com vento incidindo perpendicularmente a uma face, deverá ser determinado através da seguinte expressão,

$$c_f = c_{f,0} \cdot \Psi_r \cdot \Psi_\lambda \quad (3.3)$$

Em que,

- $c_{f,0}$  Coeficiente de força para elementos de seção retangular com arestas vivas e sem livre escoamento em torno das extremidades, fornecido na Fig.3.1;
- $\Psi_r$  Coeficiente de redução para secções quadradas com cantos arredondados; o valor de  $\Psi_r$  depende do número de Reynolds ( ver a **Nota 1**);
- $\Psi_\lambda$  Coeficiente de efeitos de extremidade para elementos cujas extremidades sejam livremente contornadas pelo, conforme é definido em 3.5.5

**Nota 1** - Os valores de  $\Psi_r$  poderão ser fornecidos no Anexo Nacional da EN 1991-1-4 [20]. Na Fig.3.2 são fornecidos valores aproximados, recomendados, para os limites superiores de  $\Psi_r$ . Estes valores são obtidos em condições de baixa turbulência, independente do numero de Reynolds do escoamento. Em termos de segurança, admite-se que são valores conservativos.

<sup>1</sup> A Norma cobre a resposta dinâmica das estruturas devida à turbulência longitudinal (isto é, na direção do vento médio) em ressonância com as vibrações, igualmente na direção do vento, segundo um modo fundamental de flexão cuja configuração não apresenta qualquer inversão de sinal.

<sup>2</sup> Caso se admita, no projeto, que as janelas e as portas dum edifício estarão fechadas em situações de tempestade, o efeito da sua abertura deverá ser tratado como uma SP acidental. Tais situações, em que a ação do vento será uma ação de acidente, constituem exceções à regra geral de classificar a ação do vento como uma ação variável.

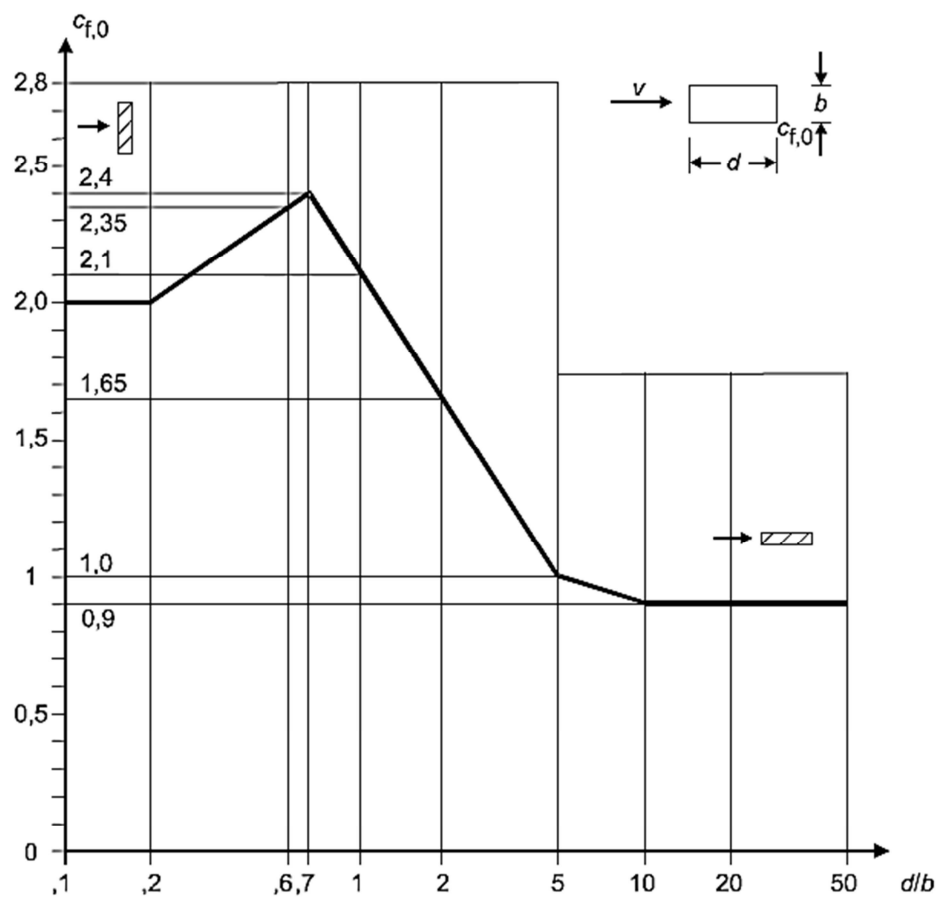


Fig.3.1 - Coeficiente de força,  $c_{f,0}$ , para seções retangulares com arestas vivas e sem livre escoamento em torno das extremidades do elemento[20]

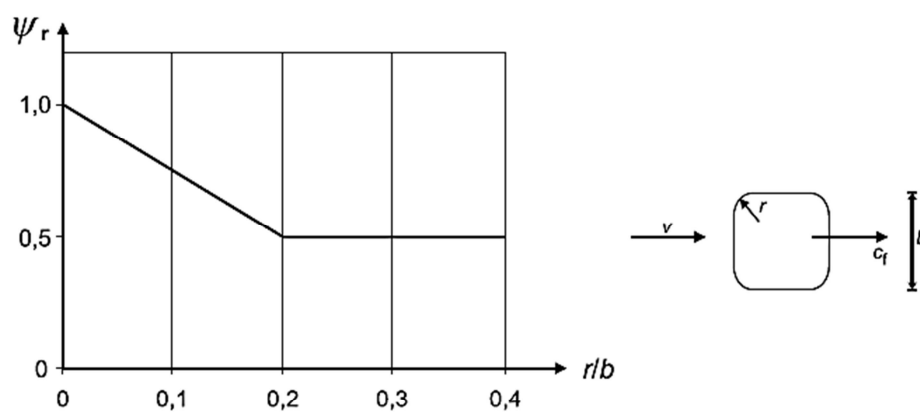


Fig.3.2 - Coeficiente de redução  $\psi_r$  para uma seção transversal quadrada com cantos arredondados[20]



### 3.5.3. ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE SECÇÃO COM ARESTAS VIVAS

O coeficiente de força,  $c_f$ , para elementos estruturais de secção com arestas vivas (na Fig.3.3 apresentam-se exemplos de secções deste tipo) deverá ser determinado através da seguinte expressão,

$$c_f = c_{f,0} \cdot \Psi_\lambda \quad (3.4)$$

Em que,

$\Psi_\lambda$  Coeficiente de efeitos de extremidade, ver subcapítulo 3.5.5

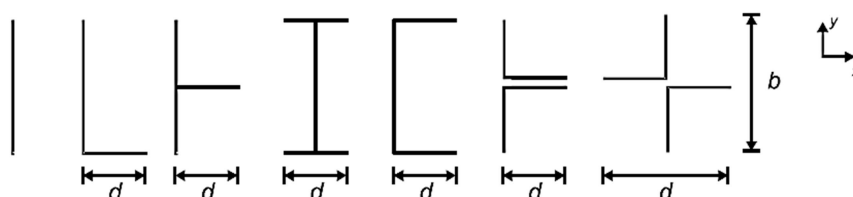


Fig.3.3 - Secções estruturais com arestas vivas[20]

### 3.5.4. ESTRUTURAS TRELIÇADAS

O coeficiente de força,  $c_f$ , para estruturas treliçadas de cordas paralelas deverá ser obtido através da seguinte expressão,

$$c_f = c_{f,0} \cdot \Psi_\lambda \quad (3.5)$$

Em que,

$c_{f,0}$  Coeficiente de força para estruturas treliçadas sem efeitos de extremidade, fornecido pelas Fig.3.5 e Fig.3.6 em função do índice de cheios,  $\phi$ ;

$\Psi_\lambda$  Coeficiente de efeitos de extremidade, ver subcapítulo 3.5.5, o qual é função da esbelteza da estrutura,  $\lambda$ , calculada com  $\ell$  e  $b=d$ , ver Fig.3.4.

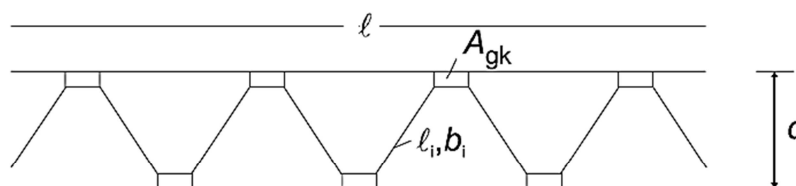


Fig.3.4 – Estrutura treliçada[20]

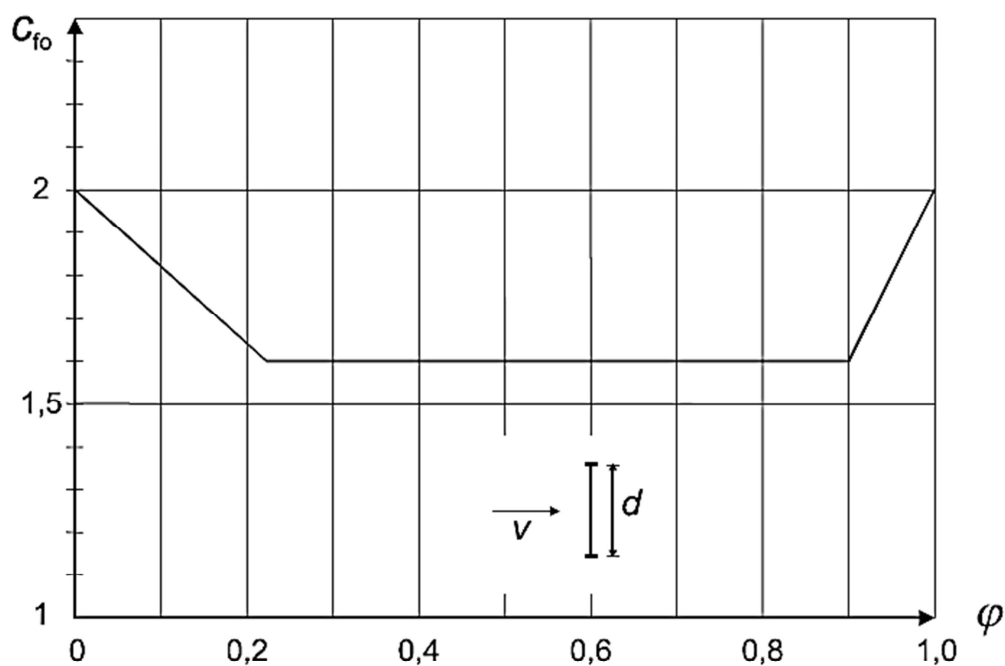


Fig.3.5 - Coeficiente de força  $c_{f,0}$  para uma estrutura treliçada plana constituída por perfis de secção angular, em função do índice de cheios  $\varphi$  [20]

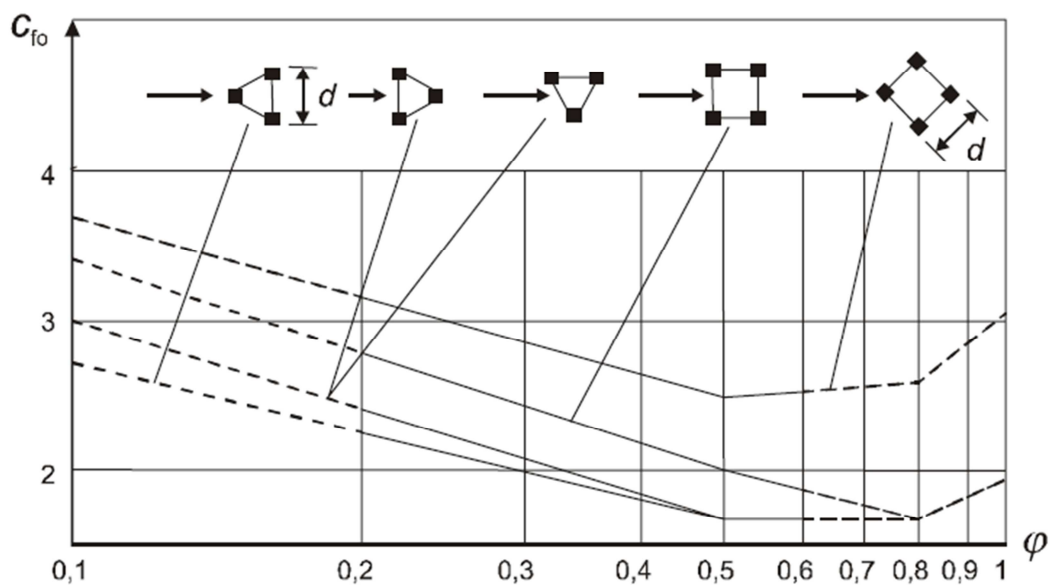


Fig.3.6 - Coeficiente de força  $c_{f,0}$  para uma estrutura treliçada espacial constituída por perfis de secção angular, em função do índice de cheios  $\varphi$  [20]

O índice de cheios,  $\varphi$ , ver Fig.3.7, é definido pela seguinte expressão,

$$\varphi = \frac{A}{A_c} \quad (3.6)$$

Em que,

- $A$  Soma das áreas das projeções no plano da face, perpendiculares a esse plano, de todos os elementos e chapas de gousset da face:  $A = \sum_i b_i \cdot l_i + \sum_k A_{gk}$
- $A_c$  Área limitada pelo contorno da face em projeção normal à mesma;
- $\ell$  Comprimento da treliça;
- $d$  Largura da treliça;
- $b_i, \ell_i$  Largura e comprimento do elemento  $i$ , ver Fig.3.4, projetada perpendicular à face;
- $A_{gk}$  Área da chapa de gousset  $k$

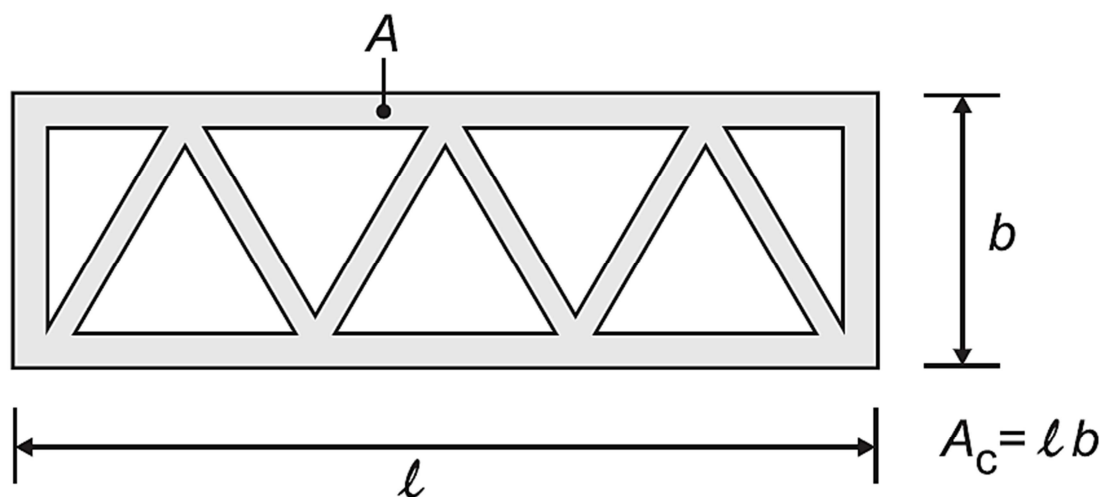
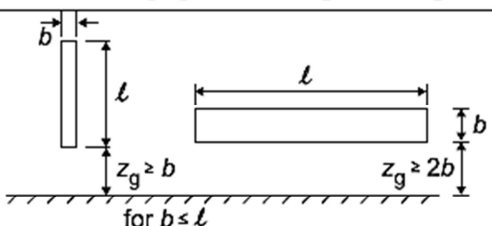
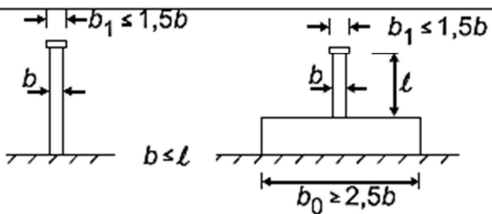
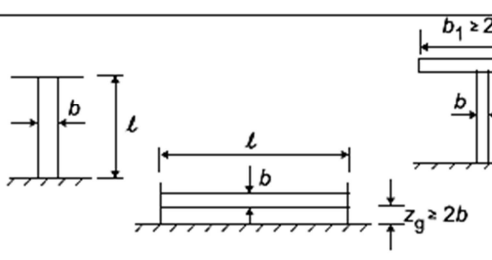


Fig.3.7 – Definição do índice de cheios,  $\varphi$  [20]

### 3.5.5. ESBELTEZA EFETIVA E COEFICIENTE DE EFEITOS DE EXTREMIDADE

O coeficiente de efeitos de extremidade,  $\psi_\lambda$ , pode ser obtido através da Fig.3.8 em função do índice de cheios e da esbelteza efetiva,  $\lambda$ . Para este efeito, segundo o Anexo Nacional (NA) da EN 1991-1-4 [20], os valores de  $\lambda$  devem ser determinados de acordo o Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Esbelteza efetiva  $\lambda$  [20]

N.º	Posição da estrutura, vento perpendicular ao plano da figura	Esbelteza efectiva $\lambda$
1		$\lambda = l/b$
2		$\lambda = 2,0b$
3		$\lambda = \infty$ ( $\psi_\lambda = 1$ )

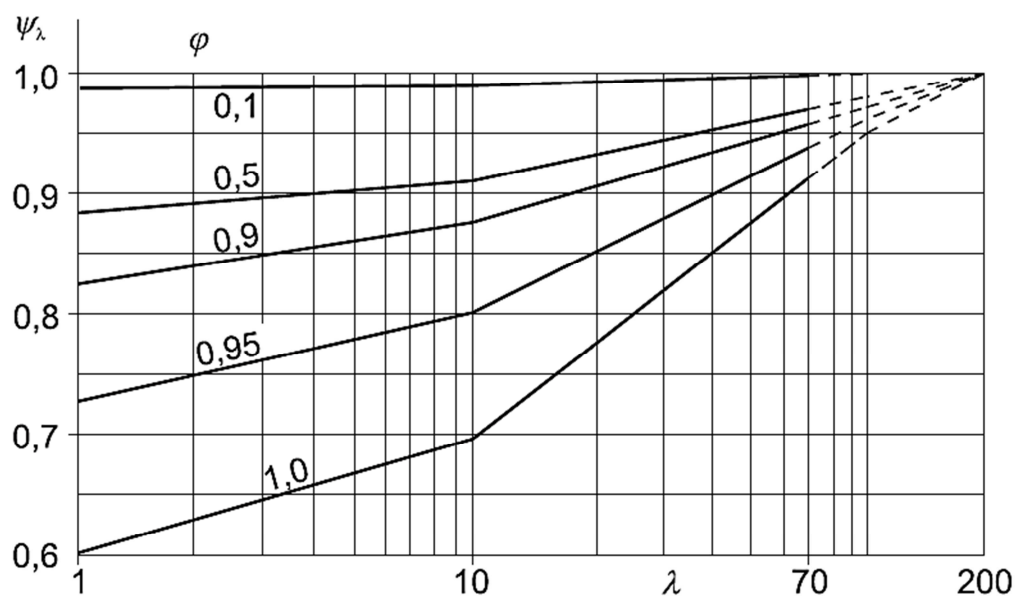


Fig.3.8 – Valores indicativos do coeficiente de efeitos de extremidade,  $\psi_\lambda$ , em função do índice de cheios,  $\phi$ , e da esbelteza,  $\lambda$  [20]

### 3.6. ESCOAMENTO EM TORNO DE UMA SECÇÃO ANGULOSA ISOLADA

No decorrer deste subcapítulo, serão apresentados os passos que foram seguidos e as opções tomadas na modelação da secção apresentada na Fig.3.9 no programa de análise computacional, *ANSYS Fluent*.

#### 3.6.1. GEOMETRIA DA SECÇÃO

A secção utilizada é uma secção tipo L como mostra a Fig.3.9.

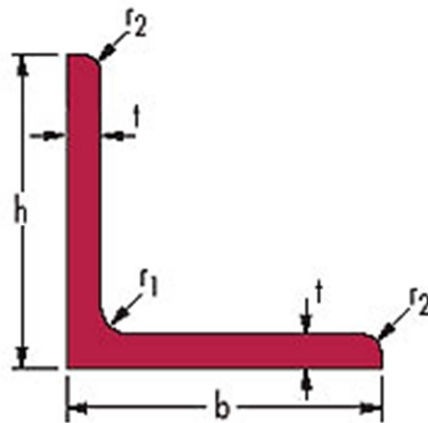


Fig.3.9 – Perfil Metálico L 100x100x10 (mm)

#### Dimensões da Secção:

h	100 mm;	r1	12 mm;	t	10 mm.
b	100 mm;	r2	6 mm;		

#### 3.6.2. PROPRIEDADES DO DOMÍNIO DE INTEGRAÇÃO DA SECÇÃO

De forma a simular o escoamento do fluido em torno da secção, deverá ser criado um género de túnel de vento em redor da secção, designado por domínio de integração. A Fig.3.10 mostra as dimensões do domínio de integração geradas para a secção. As dimensões usadas são em função do comprimento das abas da secção e foram determinadas com base em vários ensaios realizados onde se observou a influência da interação dos limites de integração nos resultados finais. As mesmas dimensões também se verificaram ser suficientes para que se pudesse observar todos os fenómenos do escoamento em torno da secção. A secção encontra-se centrada com o domínio de integração.

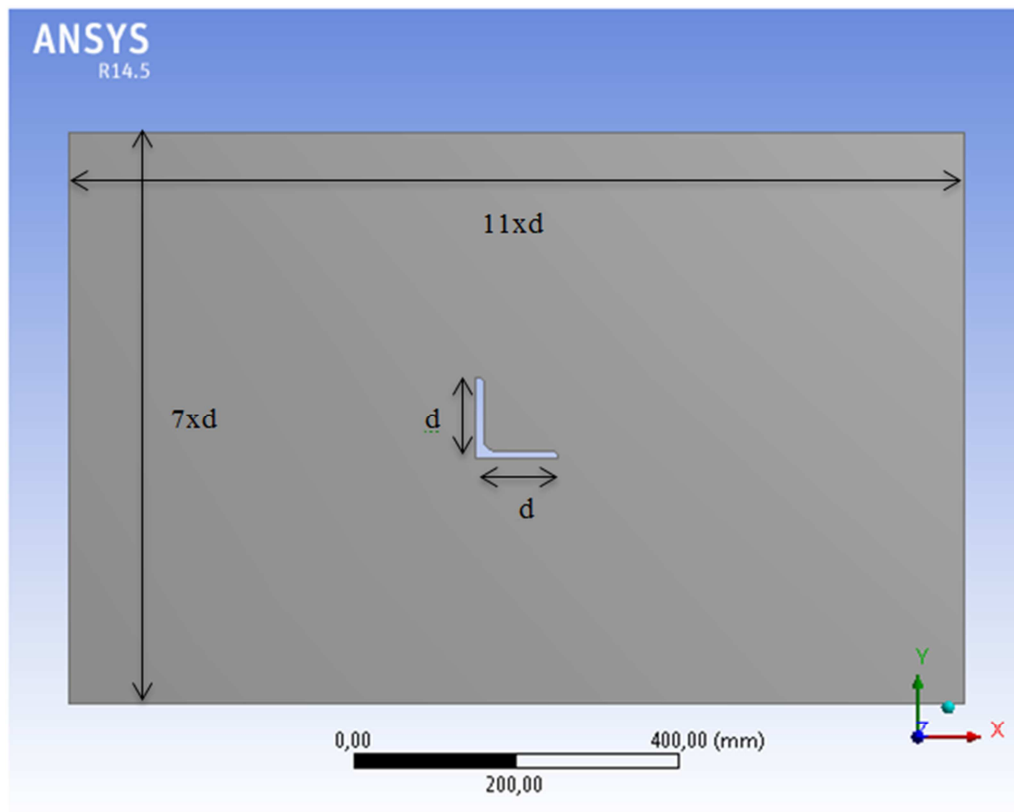


Fig.3.10 – Imagem retirada do ANSYS com as dimensões em função de  $d$ , dimensão da aba

### 3.6.3. CRIAÇÃO E PROPRIEDADES DA MALHA

A malha foi gerada automaticamente no *ANSYS Meshing* com base no modelo de geração de malha para CFD e adaptada para ser analisada no *ANSYS Fluent*. Posteriormente à sua geração observou-se a geometria dos elementos da malha na proximidade da secção e nos limites do domínio e procedeu-se à alteração e aplicação de metodologias na geração da malha de forma a obter-se uma malha com melhor qualidade e assim fornecer resultados mais próximos da realidade.

A alteração passou pela modificação das dimensões dos elementos, onde foram alterados alguns parâmetros da dimensão da malha, de forma a se obter um domínio mais fino e com elementos mais regulares.

Foram utilizadas duas metodologias distintas, uma aplicada à dimensão dos elementos adjacentes às paredes da secção, que passou pela aplicação de um refinamento nessa zona, tornando assim uma malha mais detalhada na zona de contacto, a outra aplicação foi na escolha da geometria dos elementos, onde se optou pela utilização de elementos quadriláteros, devido a sua simetria e daí se obter melhor resultados.

As propriedades mais importantes das malhas são as que dizem respeito à sua qualidade. De modo a obter-se uma simulação numérica com boa precisão e rápida convergência de resultados é necessário que os elementos da malha gerada tenham certas características geométricas.

Para cada malha gerada, o *ANSYS Meshing* fornece um relatório de qualidade, onde inclui três elementos importantes para a sua qualidade:

- **Element Quality** – Define a qualidade do elemento e é calculado para cada elemento de um modelo (excluindo linha e ponto do elemento). A opção *Element Quality* fornece uma qualidade métrica da sua composição que varia entre 0 e 1. Esta métrica é baseada na razão entre o volume para o comprimento da aresta de um determinado elemento. Um valor de 1 indica um cubo ou quadrado perfeito, enquanto um valor de 0 indica que o elemento tem um volume de zero ou negativo.
- **Skewness** – Em português significa assimetria e é definido pela diferença entre a forma de uma elemento e a forma do elemento adjacente de volume semelhante. Malhas com um *skewness* muito elevado conduzem a baixa precisão e podem desestabilizar a solução. Por exemplo, malhas quadrangulares ideais têm elementos cujos vértices têm 90 graus. O valor de *skewness* máximo para soluções em duas dimensões não deve exceder 0,98 [11].
- **Aspect Ratio** – Não tem significado direto para português, mas pode-se entender como uma proporção e é a medida do alongamento de uma célula. Um *Aspect Ratio* pequeno permite que uma simulação obtenha resultados precisos sem ser necessário um elevado número de elementos da malha. O Fluent aconselha a que os elementos tenham um Aspect Ratio entre 1 e 5. [11]

Na Fig.3.11 é apresentada a malha final que foi gerada para a secção da Fig.3.9, onde se obteve os melhores parâmetros de qualidade, apresentados no Quadro 3.2, e que levou a resultados finais mais próximos do esperado.

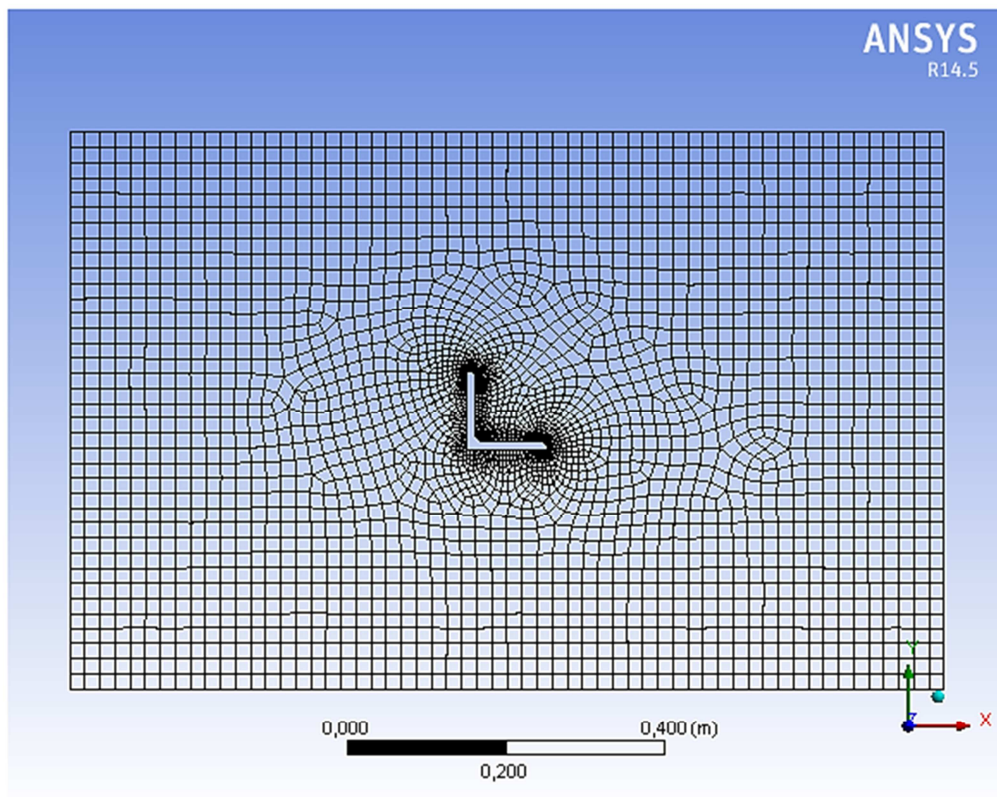


Fig.3.11 – Malha gerada no ANSYS Meshing

Quadro 3.2 – Parâmetros de qualidade da malha

Parâmetros	
Número de Elementos	3293
Número de Nós	3469
<i>Element Quality</i>	89%
<i>Skewness</i>	0,65
<i>Aspect Ratio</i>	3,09

### 3.6.4. MODELAÇÃO ANSYS FLUENT

#### 3.6.4.1. Propriedades do Escoamento

Para se efetuar a simulação no *ANSYS Fluent* têm de se impor condições de fronteira na entrada do fluido no domínio. O fluido em estudo é o ar, e as propriedades impostas estão descritas no quadro 3.3,

Quadro 3.3 – Propriedades do Fluido

Características	Ar
Massa Volúmica	1,225 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade	1,7894 x 10 <sup>-5</sup> Pa.s
Velocidade	27 m/s
Intensidade de Turbulência	1 %
Relação entre Viscosidades	1
Pressão Atmosférica	101325 Pa

#### 3.6.4.2. Definição das condições de fronteira

As condições de fronteira, usadas neste estudo, como mostra na Fig.3.12, foram definidas, com a ajuda do *ANSYS Help*, de acordo com as propriedades do fluido e com o tipo de escoamento. Ao longo das paredes horizontais as condições de fronteira são de velocidade nula, normal às paredes.

- Entrada do escoamento, definido como INLET – *Velocity-inlet*;
- Saído do Escoamento, definido como OUTLET – *Outflow*;
- Superfície de escoamento, definido como SURFACE – *Fluid*;



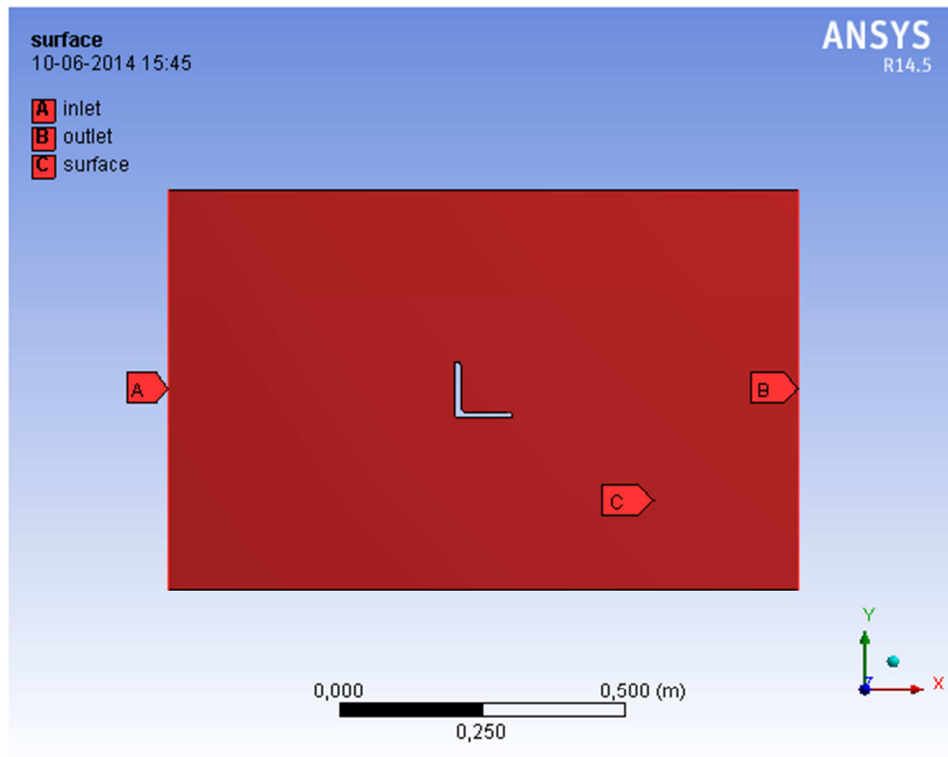


Fig.3.12 – Imagem ANSYS *Fluent*, descrição das condições de fronteira

#### 3.6.4.3. Procedimento numérico para resolver as equações de Navier-Stokes

O algoritmo SIMPLE, acrónimo de *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*, serve como base na resolução das equações algébricas dos escoamentos. Este utiliza correções na relação entre a velocidade e a pressão para impor a conservação da massa e para obter o campo de pressões. A discretização espacial deste algoritmo contém definições que controlam a discretização espacial dos termos da convecção das equações. Estes foram as definições impostas para o tratamento das várias componentes da discretização espacial,

- Gradiente – *Least-Squares Cell-Based*;
- Pressão – *Standard*;
- Quantidade de Movimento – *Power law*;
- Energia Cinética Turbulenta – *Power law*;
- Taxa de dissipação Turbulenta – *Power law*.

#### 3.6.5. SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO

Neste subcapítulo serão apresentadas as simulações efetuadas, com os vários modelos de turbulência, para a secção apresentada na Fig.3.9. Na Fig.3.13 está indicada a convenção de eixos usada na análise.

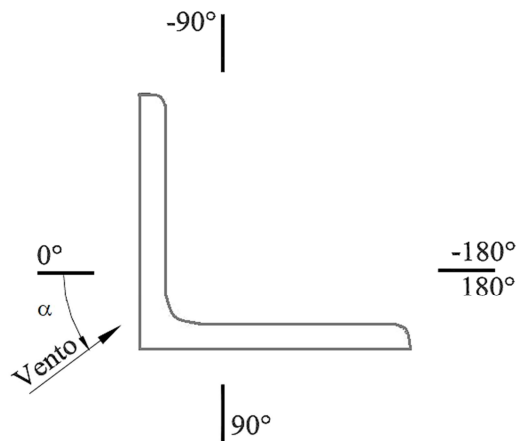


Fig.3.13 – Convenção dos eixos e indicação dos ângulos de incidência do vento

### 3.6.5.1. Resultados Experimentais

Os resultados experimentais a apresentar foram retirados de uma dissertação na Universidade Federal do Rio Grande do Sul [2] onde foram elaborados ensaios em túnel de vento de uma secção com geometria muito próxima da Fig.3.9. Na Fig.3.14 estão presentes os coeficientes de arrasto obtidos na análise experimental,  $C_{fx}$ , em função do ângulo de incidência, tipo de regime e geometria da secção. Os valores usados para comparação são os relativo ao modelo **E2** (modelo com arestas boleadas).

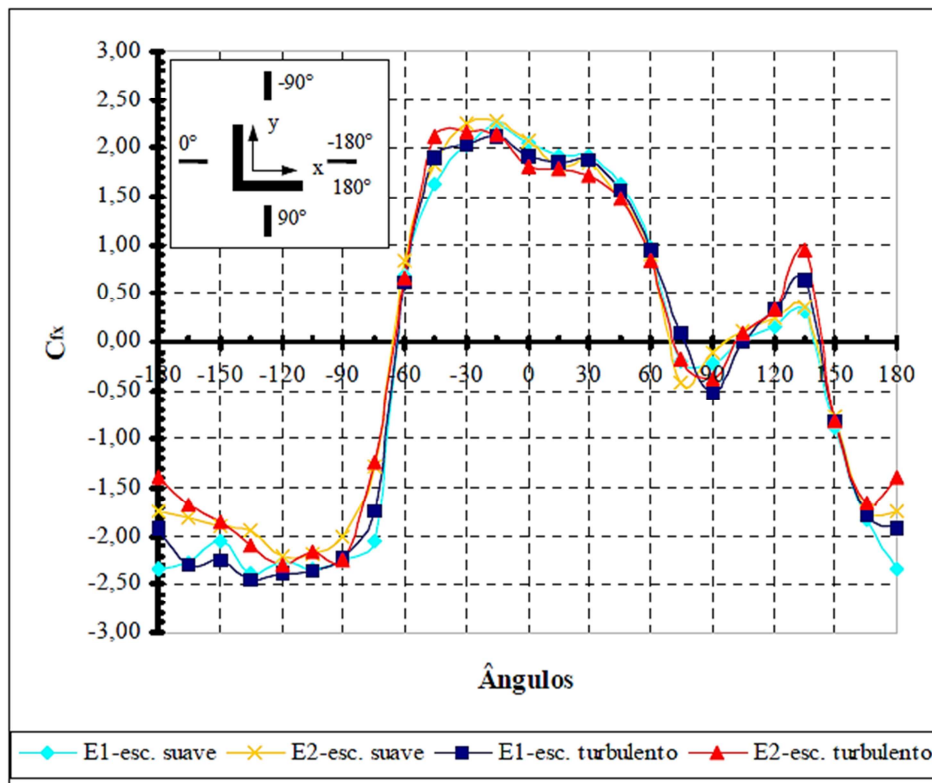


Fig.3.14 – Comparação entre os coeficientes de força dos modelos E1 e E2, submetidos aos escoamentos suave e turbulento em função dos ângulos de incidência do vento, -180° a 180°. [2]

3.6.5.2. Simulação do escoamento com os modelos de turbulência k- $\epsilon$ 

Nesta secção serão apresentados os resultados obtidos dos coeficientes de arrasto,  $C_d$ , para cada modelo de turbulência k- $\epsilon$  (Standard, RNG e Realizable) e em função dos ângulos de incidência do vento estudados ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $180^\circ$ ), como se pode observar no quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Coeficiente de Arrasto

		Cd		
		0°	45°	-180°
Modelos Turbulência	Ângulos de incidência			
	Standard	2,04	1,55	-2,04
	RNG	2,04	1,55	-2,04
	Realizable	2,04	1,55	-2,04

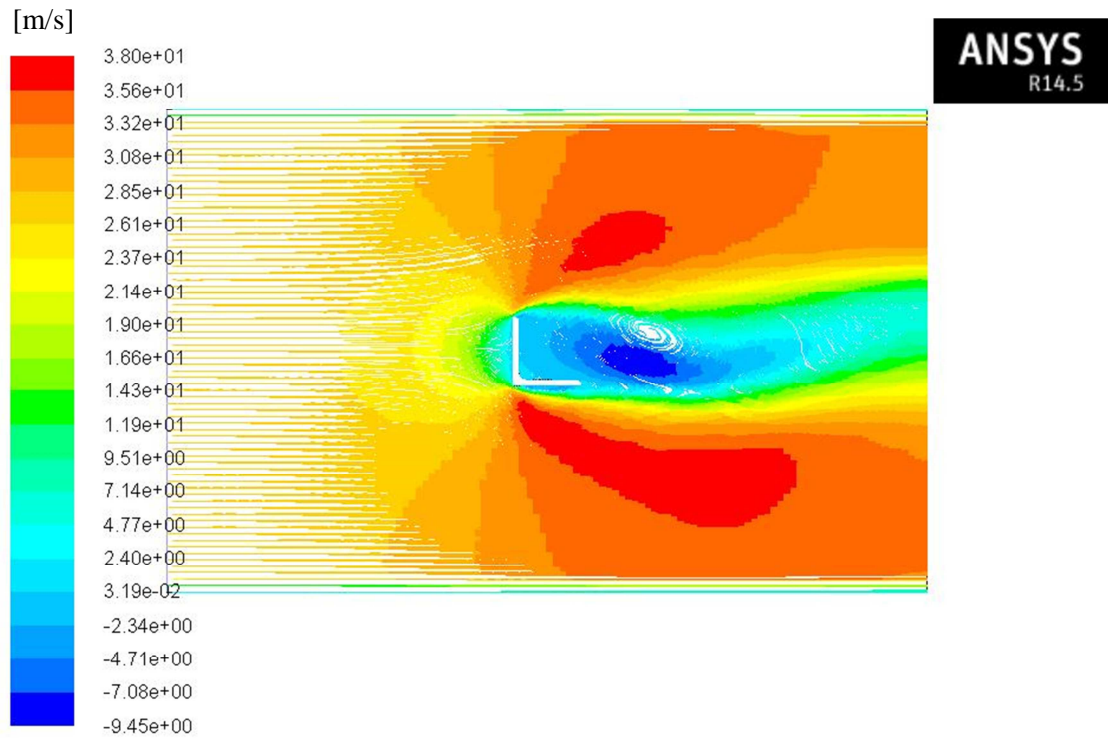
Analisando os resultados obtidos, verifica-se que para os vários modelos de turbulência o valor do coeficiente de arrasto não se altera, com isto, verificamos que para este caso em estudo os modelos de turbulência não influenciam a precisão dos resultados. Ainda assim é de salientar que na análise no *Ansys Fluent*, este desaconselha a utilização do modelo *Standard* para o estudo do escoamento, apresentando uma mensagem de erro, solicitando a substituição do modelo de turbulência *Standard* para *Realizable*.

Verificou-se ainda, para esta secção, não haver diferenças significativas, entre os resultados obtidos para o escoamento em regime laminar e turbulento. Esta verificação pode-se ainda comprovar pelos resultados experimentais [2] apresentados na Fig.3.14.

De forma a perceber como se realiza o escoamento em torno na secção, observando os locais onde se criam as pressões negativas e os locais onde as pressões são máximas, na Fig.3.15 apresentamos as linhas de correntes obtidas da análise CFD, pelo *Ansys Fluent*, para os vários ângulos de incidência estudados e em função da velocidade do escoamento.

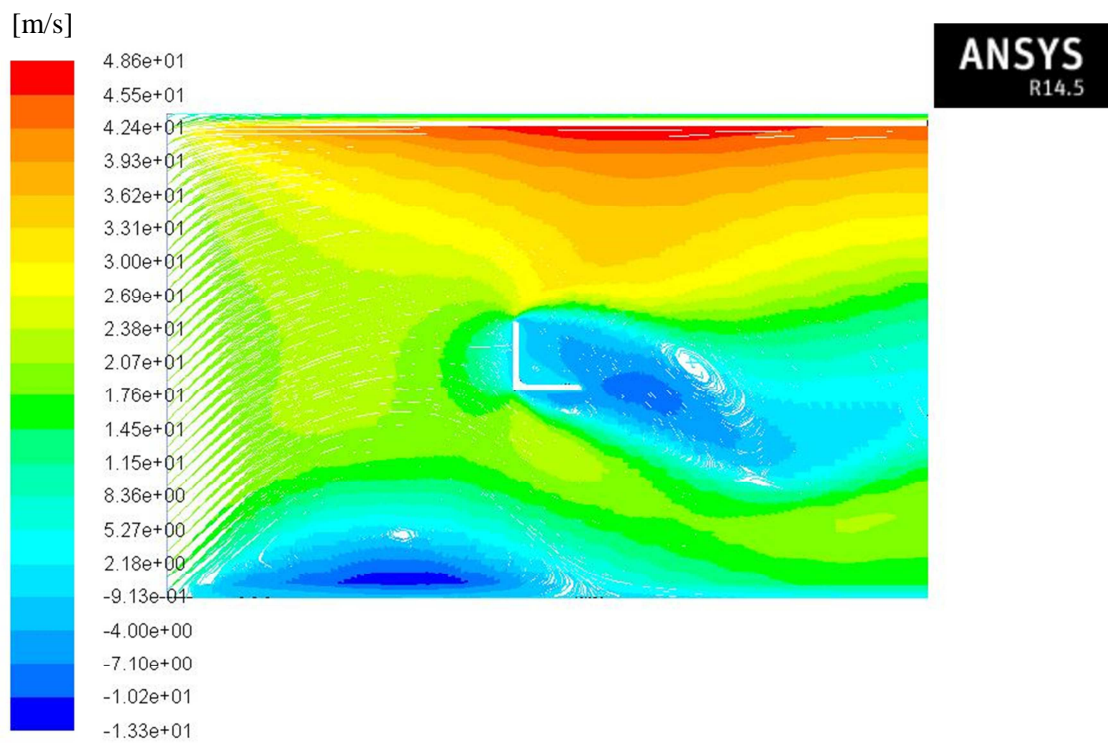
Na Fig.3.15 (a) e (b), as linhas de corrente são apresentadas à escala de cor, com a representação dos locais onde se geram as pressões negativas, zonas onde se criam os vórtices, com cor mais azulada e respetivo sinal negativo da velocidade, como podemos verificar na legenda de cores.

Já na Fig.3.15 (c), como a velocidade do vento foi introduzida com sinal negativo, para obtermos um escoamento com ângulo de incidência de  $180^\circ$ , a escala de cor e os respetivos sinais apresentam-se invertidos, ou seja, linhas de corrente mais avermelhadas e sinal positivo para as velocidades para os locais onde se geram as pressões negativas, zonas onde se criam os vórtices.

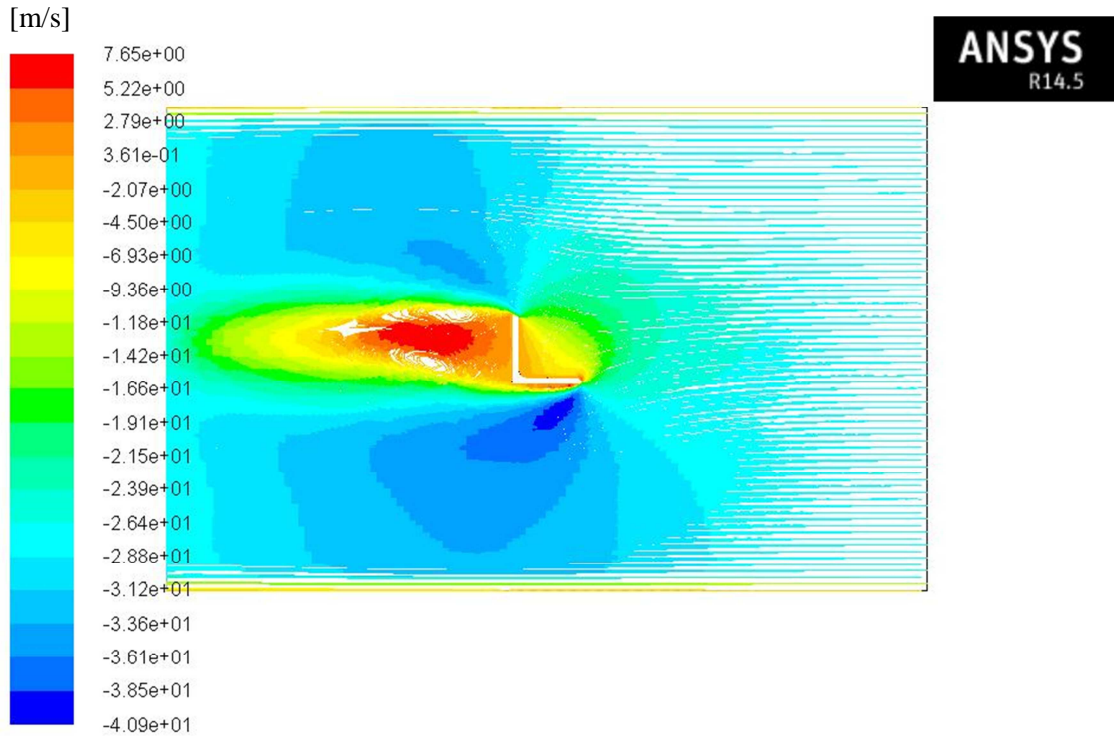


(a)

Fig.3.15 – Escoamento em torno da secção para os ângulos de incidência 0°,45 e 180° correspondente a (a), (b) e (c) respectivamente.



(b)



(c)

Fig.3.15 – Escoamento em torno da secção para os ângulos de incidência  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $180^\circ$  correspondente a (a), (b) e (c) respectivamente.

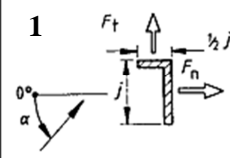
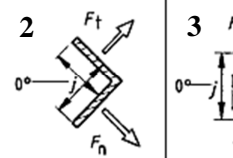
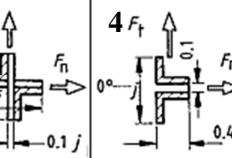
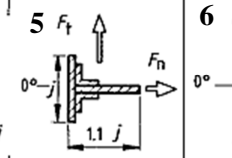
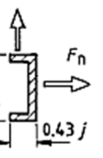
### 3.6.6. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

A análise comparativa dos resultados teve por base a EN 1991-1-4[20], norma Britânica (BS)[22] e resultados experimentais [2]. O cálculo do coeficiente de arrasto pela EN 1991-1-4 está descrito no subcapítulo 3.5.3. No quadro 3.5 apresentam-se os valores dos parâmetros obtidos para a secção em estudo, na determinação do coeficiente de arrasto para os vários ângulos de incidência estudados. No cálculo do coeficiente de efeitos de extremidade,  $\psi_\lambda$ , optou-se, de uma forma conservativa, usar o valor igual à unidade. Como a EN 1991-1-4 não faz referência à determinação do coeficiente de arrasto para ângulos de incidência diferentes dos eixos principais, não foi possível a determinação do coeficiente de arrasto para o ângulo de  $45^\circ$  pela norma EN 1991-1-4.

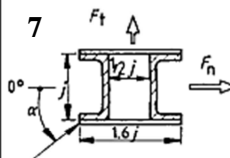
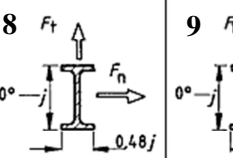
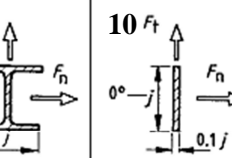
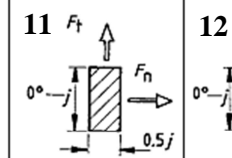
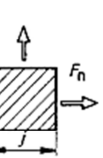
Quadro 3.5 – Parâmetros para a determinação do Coeficiente de Arrasto segundo a EN 1991-1-4

Parâmetros	Valores Obtidos
d	100 mm
b	100 mm
$C_{f,0}$	2,1
$\psi_\lambda$	1

A norma Britânica (BS) apresenta um quadro, Fig.3.16, com os valores dos coeficientes de arrasto, na direção normal e tangencial do vento, para vários tipos de secções angulosas e em função do angulo de incidência do vento.

<b>1</b> 			<b>2</b> 			<b>3</b> 			<b>4</b> 			<b>5</b> 			<b>6</b>		
$\alpha$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	
degrees																	
0	+1.9	+0.95	+1.8	+1.8	+1.75	+0.1	+1.6	0	+2.0	0	+2.05	0	+1.85	+0.6	+1.9	+0.95	
45	+1.8	+0.8	+2.1	+1.8	+0.85	+0.85	+1.5	-0.1	+1.2	+0.9	+1.85	+0.6	+1.8	+0.8	+2.1	+1.8	
90	+2.0	+1.7	-1.9	-1.0	+0.1	+1.75	-0.95	+0.7	-1.6	+2.15	0	+0.6	-1.85	-0.6	-2.1	-1.8	
135	-1.8	-0.1	-2.0	+0.3	-0.75	+0.75	-0.5	+1.05	-1.1	+2.4	-1.6	+0.4	-1.85	-0.6	-2.1	-1.8	
180	-2.0	+0.1	-1.4	-1.4	-1.75	-0.1	-1.5	0	-1.7	+2.1	-1.8	0	-1.85	0	-2.0	+0.1	

<b>7</b> 			<b>8</b> 			<b>9</b> 			<b>10</b> 			<b>11</b> 			<b>12</b>		
$\alpha$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	$C_{fm}$	$C_{ft}$	
degrees																	
0	+1.4	0	+2.05	0	+1.6	0	+2.0	0	+2.1	0	+2.0	0	+1.55	+1.55	+1.4	0	
45	+1.2	+1.6	+1.95	+0.6	+1.5	+1.5	+1.8	+0.1	+1.4	+0.7	+1.55	+1.55	+1.2	+1.2	+1.95	+1.6	
90	0	+2.2	+0.5	+0.9	0	+1.9	0	+0.1	0	+0.75	0	+2.0	0	+2.2	0	+1.4	

NOTE In this table the force coefficient  $C_f$  is given in relation to the dimension  $j$  and not, as in other cases, in relation to the effective frontal area  $A_e$ .

Fig.3.16 – Coeficiente de força  $C_{fn}$  e  $C_{ft}$  para elementos estruturais individuais (faces planas) de comprimento infinito, adaptado de [22]

Para o nosso caso em estudo os valores a ter em consideração, são os respetivos à secção tipo L de abas iguais, que corresponde ao elemento numero 2 da Fig.3.16.

Analisando a Fig.3.14 e 3.16 e resolvendo a equação 3.4 com os parâmetros obtidos do quadro 3.5, apresentamos no quadro 3.6, os valores obtidos para os coeficientes de arrasto em função do angulo de incidência.

Analisando o quadro 3.6, verificamos que a simulação CFD pelo *Ansys Fluent* apresenta resultados muito próximos das normas, EN 1991-1-4 e Britânica (BS), sendo a EN 1991-1-4, mais conservativa do que a norma Britânica (BS), para as direções de 0° e 180°. Relativamente aos resultados obtidos pelos ensaios experimentais, verifica-se que a simulação CFD apresenta valores ligeiramente superiores, esta diferença poderá ser justificada pelas condições de fronteiras adotadas na análise CFD.

Quadro 3.6 – Quadro comparativo dos coeficientes de arrasto determinados em função do ângulo de incidência

Ângulos de incidência	Cd		
	0°	45°	180°
EN 1991-1-4	2,10	-	-2,10
Norma Britânica (BS)	2,00	1,40	-1,80
Ensaios Experimentais	1,80	1,47	-1,39
Simulação CFD	2,04	1,55	-2,04

### 3.6.7. CONCLUSÃO

No estudo do escoamento em torno da secção isolada podemos concluir que o *Ansys Fluent* se mostrou uma boa ferramenta de cálculo automático na determinação do coeficiente de arrasto e bastante potente na simulação do escoamento em torno da secção, apresentando de uma forma bastante descritiva, as linhas de corrente que se formavam em torno da secção com a clara nitidez da criação dos vórtices. Esta análise serviu ainda para calibrar o programa para as próximas análises que se irão realizar nos próximos subcapítulos.

## 3.7. ESTUDO DA INTERAÇÃO ENTRE DUAS SECÇÕES ANGULOSAS

Neste subcapítulo, estudamos o efeito de sombreamento que uma secção provoca sobre uma outra que se encontra no mesmo plano e será determinada a distância em que esse efeito deixa de existir. Para cada distância estudada será ainda determinado o coeficiente de arrasto que se gera.

As distâncias estudadas serão em função do comprimento da aba da secção. As secções usadas têm as mesmas características geométricas da secção usada no subcapítulo 3.6, Fig.3.9.

O estudo será realizado no *Ansys Fluent*, e de forma a se obter uma coerência de resultados serão utilizadas as mesmas características descritas no subcapítulo 3.6, no que diz respeito ao domínio de integração, à criação da malha e à modelação no *Ansys Fluent*.

### 3.7.1. PROPRIEDADES DO DOMÍNIO DE INTEGRAÇÃO DA SECÇÃO

As propriedades do domínio de integração encontram-se descritas no subcapítulo 3.6.2. Na Fig.3.17 apresenta-se o domínio de integração obtido para este estudo. As margens laterais entre as paredes do domínio e as secções mantiveram-se constantes, sendo variável o comprimento total do domínio em função da distância entre secções. Para este estudo verificou-se ainda que os limites adotados no estudo anterior, secção isolada, mostraram ser suficientes para estudar as linhas de corrente que se desenvolviam em torno do caso em estudo e que não se verificava influência do efeito de parede nos resultados finais.



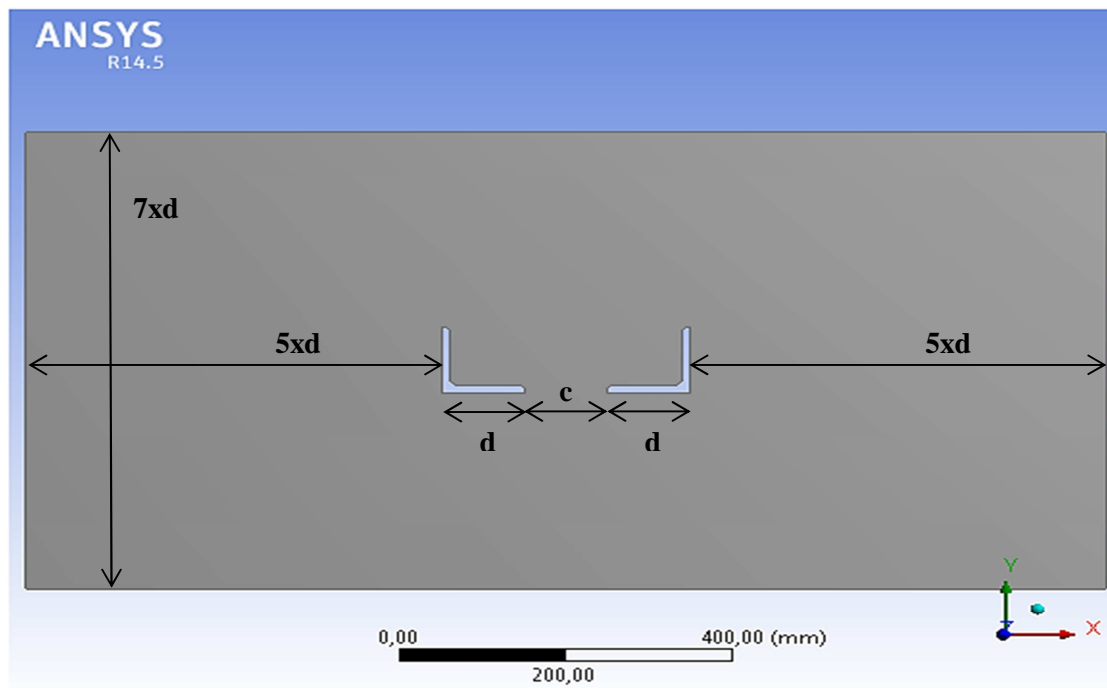


Fig.3.17 – Imagem retirada do ANSYS com as dimensões em função de  $d$ , dimensão da aba e  $c$ , distância entre secções.

### 3.7.2. CRIAÇÃO E PROPRIEDADES DA MALHA

De acordo com as propriedades adotadas no subcapítulo 3.6.3, na Fig.3.18 é apresentada a malha gerada para o domínio integração da Fig.3.17, os parâmetros de qualidade da malha obtidos são apresentados no quadro 3.7.

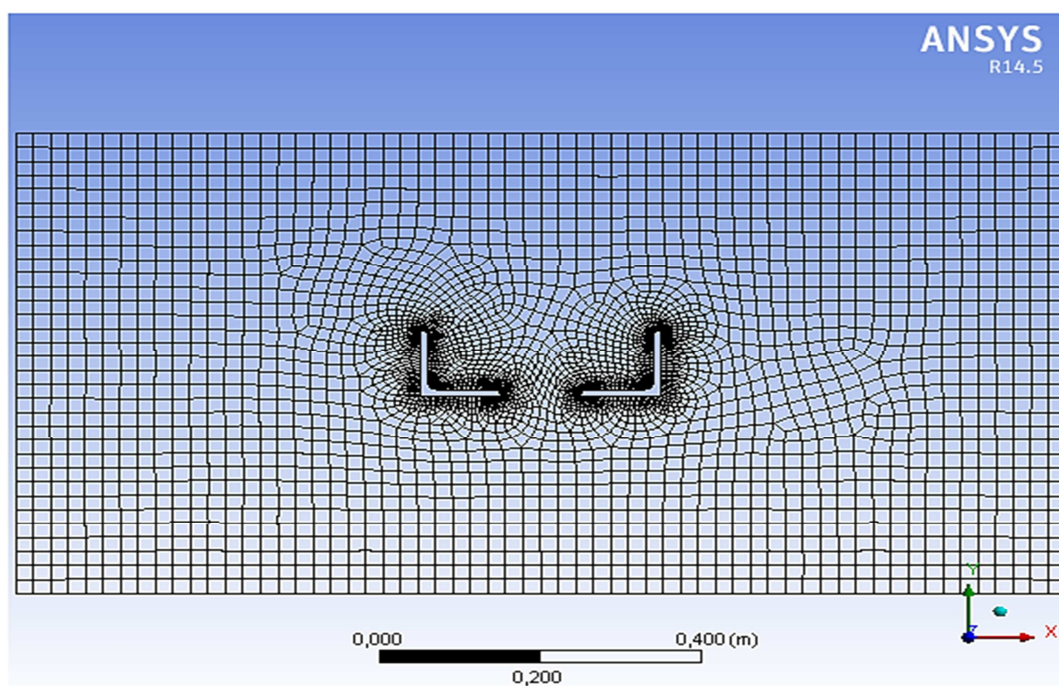


Fig.3.18 - Malha gerada no ANSYS Meshing



Quadro 3.7 – Parâmetros de qualidade da malha

Parâmetros	
Número de Elementos	4099
Número de Nós	4349
<i>Element Quality</i>	84%
<i>Skewness</i>	0,64
<i>Aspect Ratio</i>	2,95

Para este estudo, a malha gerada apresentou resultados de qualidade bastante satisfatórios. Os valores apresentados para o número de elementos e dos nós são de acordo a uma distância entre secções, **c**, igual à aba da secção, **d**, ou seja 100mm. Com a variação da dimensão **c** verificou-se que não haver grande variação dos parâmetros de qualidade.

### 3.7.3. MODELAÇÃO ANSYS FLUENT

A modelação deste caso tomou os mesmos pressupostos apresentados na secção 3.6.4, ou seja, mantiveram-se as mesmas propriedades do escoamento, as definições das condições de fronteira e o procedimento numérico para a resolução das equações de RANS.

### 3.7.4. SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO

Os dados recolhidos desta simulação são os relativos à secção que se encontra protegida, representada na Fig.3.19 com os limites vermelhos. O escoamento foi gerado unicamente na direcção de 0°, direcção em que existe o efeito de sombreamento.

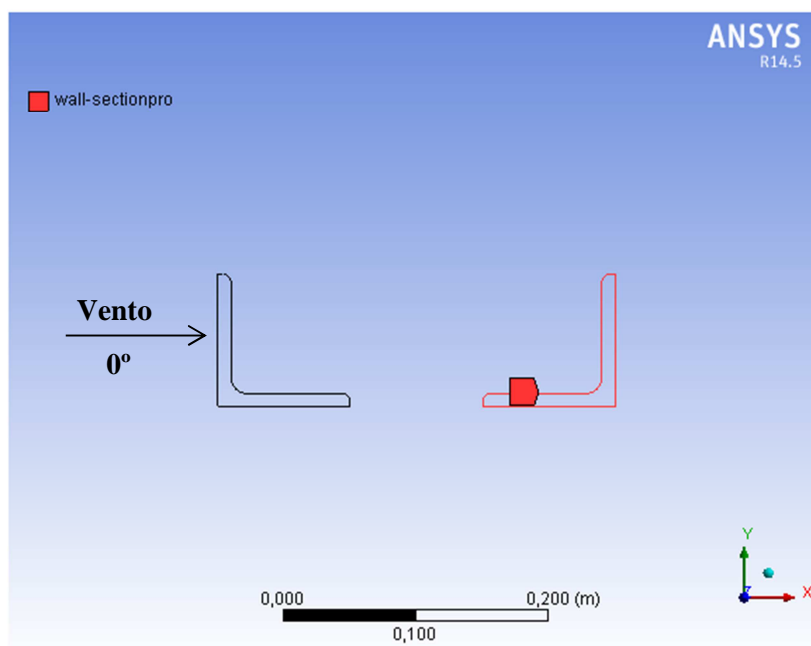


Fig.3.19 - Indicação da secção protegida e ângulo de incidência do vento

O estudo foi iniciado para uma distância entre secções, **c**, igual ao comprimento aba da secção, **d**. À medida que o valor do afastamento (**c/d**) entre as secções aumenta, é esperado que o efeito de sombreamento diminua, tendendo para um valor do coeficiente de arrasto como se o perfil estivesse isolado. Existe um determinado afastamento para o qual o coeficiente de arrasto do perfil protegido será igual ao de um perfil isolado. Assim, sendo este estudo iterativo finaliza aquando da igualdade de coeficientes de arrasto. O escoamento foi realizado para os vários modelos de turbulência k-ε. No quadro seguinte apresentam-se os coeficientes de arrasto gerados em função da distância entre secções e para cada modelo de turbulência.

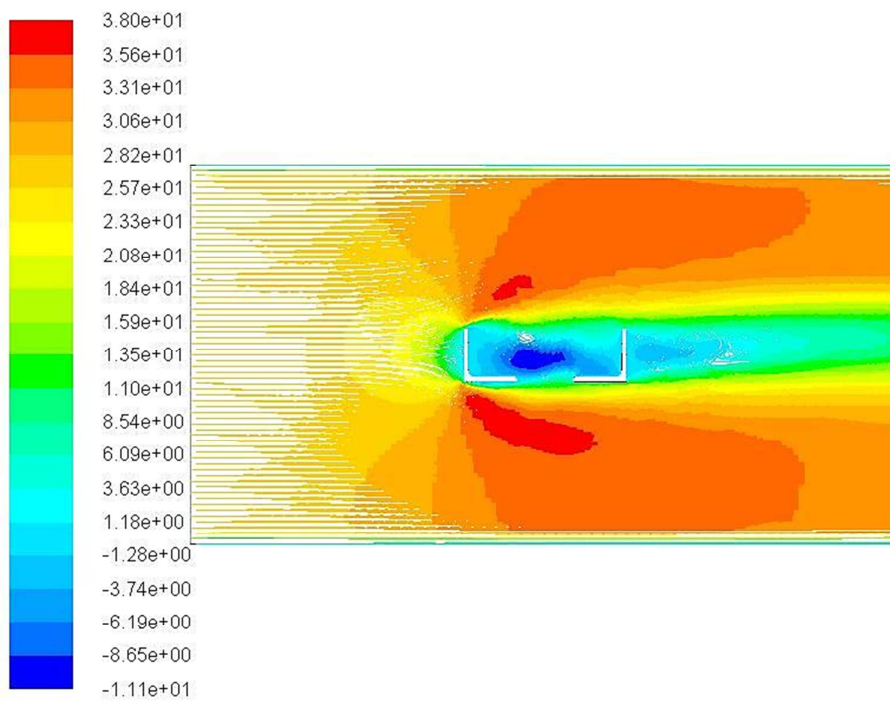
Quadro 3.8 – Coeficientes de arrasto em função do fator (**c/d**)

		<b>Cd</b>		
		<i>Standard</i>	<i>RNG</i>	<i>Realizable</i>
<b>c/d</b>	Modelos de Turbulência			
	1	1,73	1,73	1,73
	2	1,86	1,86	1,86
	4	1,87	1,87	1,87
	6	1,87	1,87	1,87
	8	1,79	1,79	1,79
	10	1,84	1,84	1,84
	12	1,97	1,97	1,97

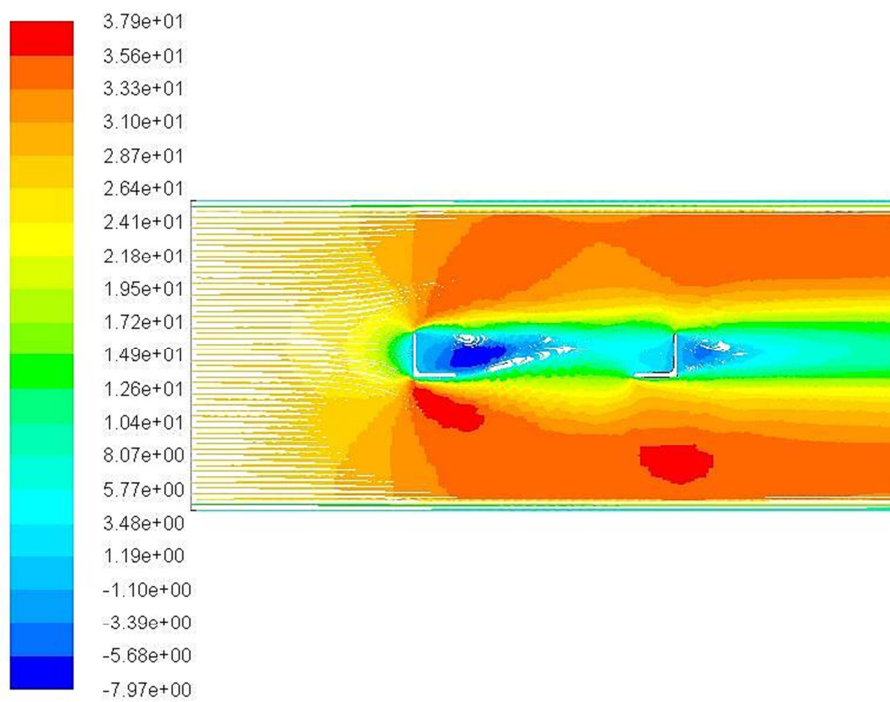
Como já tínhamos concluído no escoamento em torno da secção isolada, a não influência dos modelos de turbulência nos resultados obtidos, voltamos a verificá-la neste estudo de interação.

Analisando o quadro 3.8, verificamos que, para uma distância doze vezes superior à distância da aba da secção, existe uma redução do coeficiente de arrasto de aproximadamente 4% em relação ao modelo isolado, valor para o qual assumimos que o efeito de sombra deixa de existir. Salientamos ainda, que o valor máximo de redução do coeficiente de arrasto atingiu aproximadamente os 18%.

Na Fig.3.20, apresentamos a evolução das linhas de corrente, para  $c/d=1$ ,  $c/d=4$ ,  $c/d=8$  e  $c/d=12$ , onde observamos que para  $c/d=12$  as velocidades estabilizam antes de colidirem com a secção protegida, deixando de estarem condicionadas pela secção a barlavento.

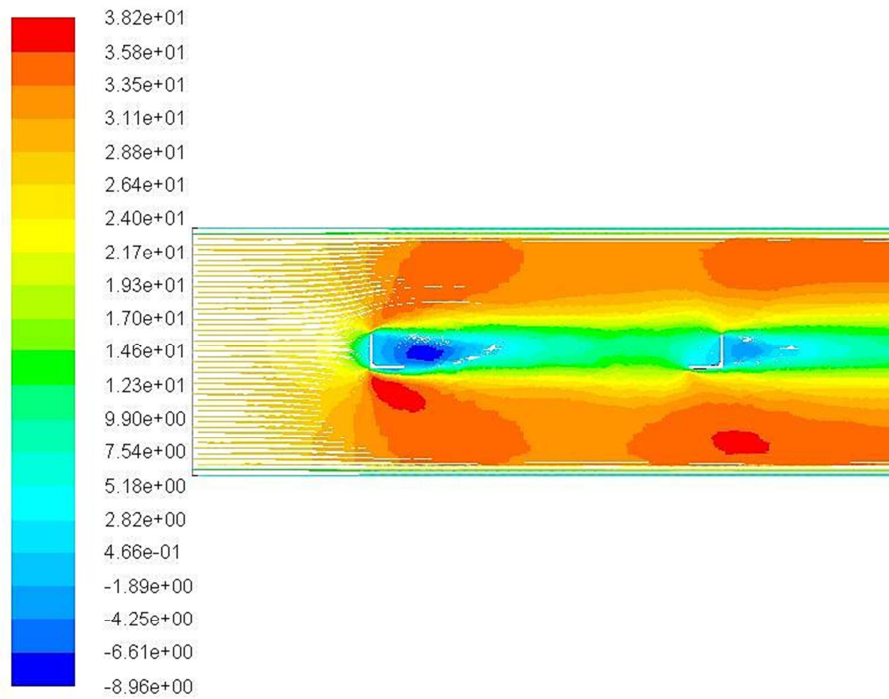


(c/d=1)

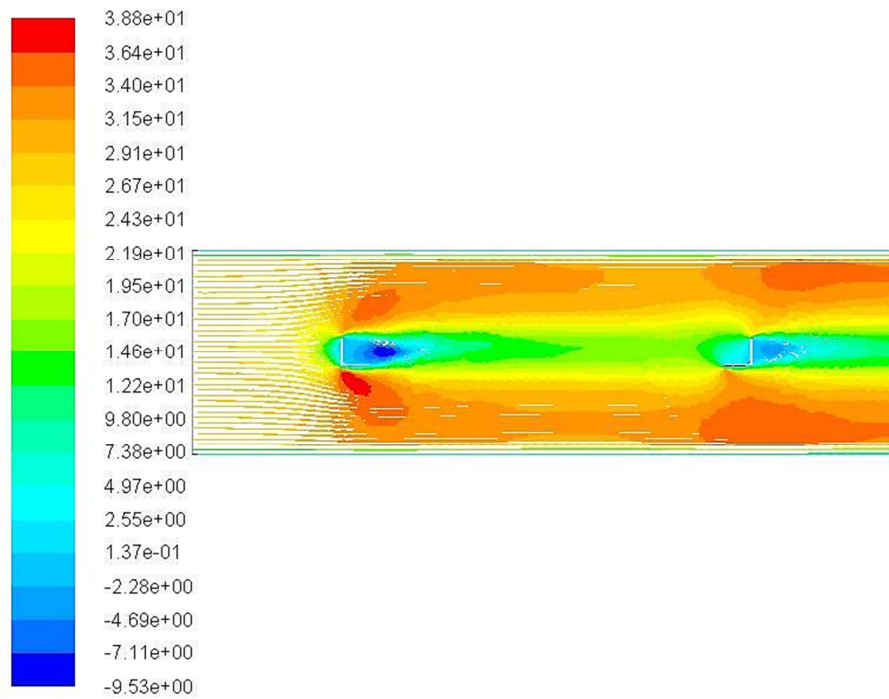


(c/d=4)

Fig.3.20 – Escoamento em torno da secção para a direção 0°, em função de c/d



(c/d=8)



(c/d=12)

Fig.3.20 – Escoamento em torno da secção para a direção 0°, em função de c/d

### 3.7.5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Estudos realizados, sobre a interação de secções no mesmo plano [2], com a mesma orientação das secções apresentada neste estudo, verificaram-se haver reduções máximas no coeficiente de arrasto na ordem dos 25%, diminuindo com o aumento do afastamento. Verificou-se ainda que para distâncias entre  $c/d=10$  e  $c/d=15$  o perfil protegido atingia o valor para o coeficiente de arrasto como se a secção se encontra-se isolada, valor, este, que foi verificado na análise CFD pelo *Ansys Fluent*.

### 3.7.6. CONCLUSÃO

As comparações, entre os resultados obtidos experimentalmente e os realizados pela análise CFD *Ansys Fluent*, mostraram-se ser muito próximas. Com isto, comprovamos que os parâmetros usados no domínio de integração assim como os usados na criação da malha se mostraram suficientes para gerar resultados que se podem afirmar validados. Com este estudo, concluímos ainda que é importante a análise da interação entre secções no mesmo plano, não só na análise da redução dos coeficientes de arrasto mas também na observação das linhas de corrente que se geram, de modo a perceber que perturbações ocorrem nas proximidades das secções.

## 3.8. ESCOAMENTO EM TORNO DE UMA ESTRUTURA TRELIÇADA ESPACIAL

Neste subcapítulo será estudado o escoamento em torno de uma estrutura treliçada espacial, onde simulamos a base de uma torre treliçada quadrada através de quadro secções angulosas. De modo a simplificar o caso em estudo, serão apenas modeladas as secções principais da estrutura, sem os elementos de contraventamento como podemos ver na Fig.3.21. A geometria das secções encontram-se representadas na Fig.3.9. O afastamento entre as secções será fixo, não analisando o efeito de interação. Referente à modelação no *Ansys Fluent*, serão aproveitados os parâmetros usados nos subcapítulos 3.6 e 3.7, assim como as características do domínio de integração e os padrões usados na criação da malha. Este estudo resultará na determinação do coeficiente de arrasto, gerado para o ângulo de incidência de  $0^\circ$ , que posteriormente será comparado com o determinado pela norma EN 1991-1-4[20].

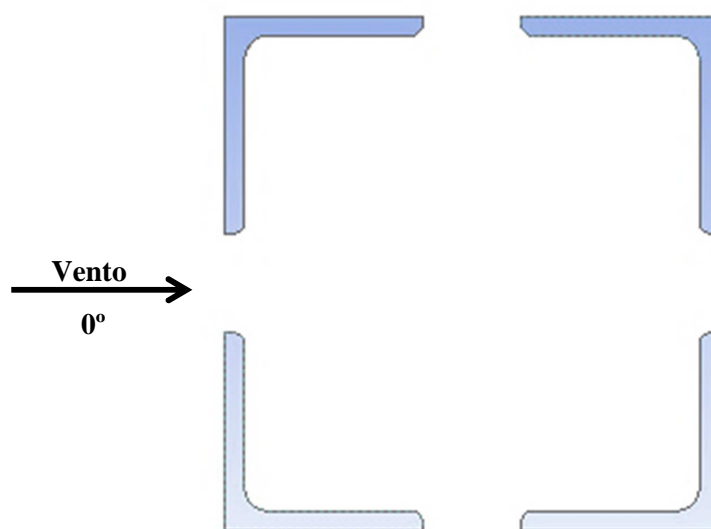


Fig.3.21 – Disposição das secções, imagem *Ansys Fluent*

### 3.8.1. PROPRIEDADES DO DOMÍNIO DE INTEGRAÇÃO DA SECÇÃO

Na Fig.3.22, exibimos a estrutura limitada pelo domínio de integração assim com a distância entre secções usada para o estudo do escoamento em função das abas das secções.

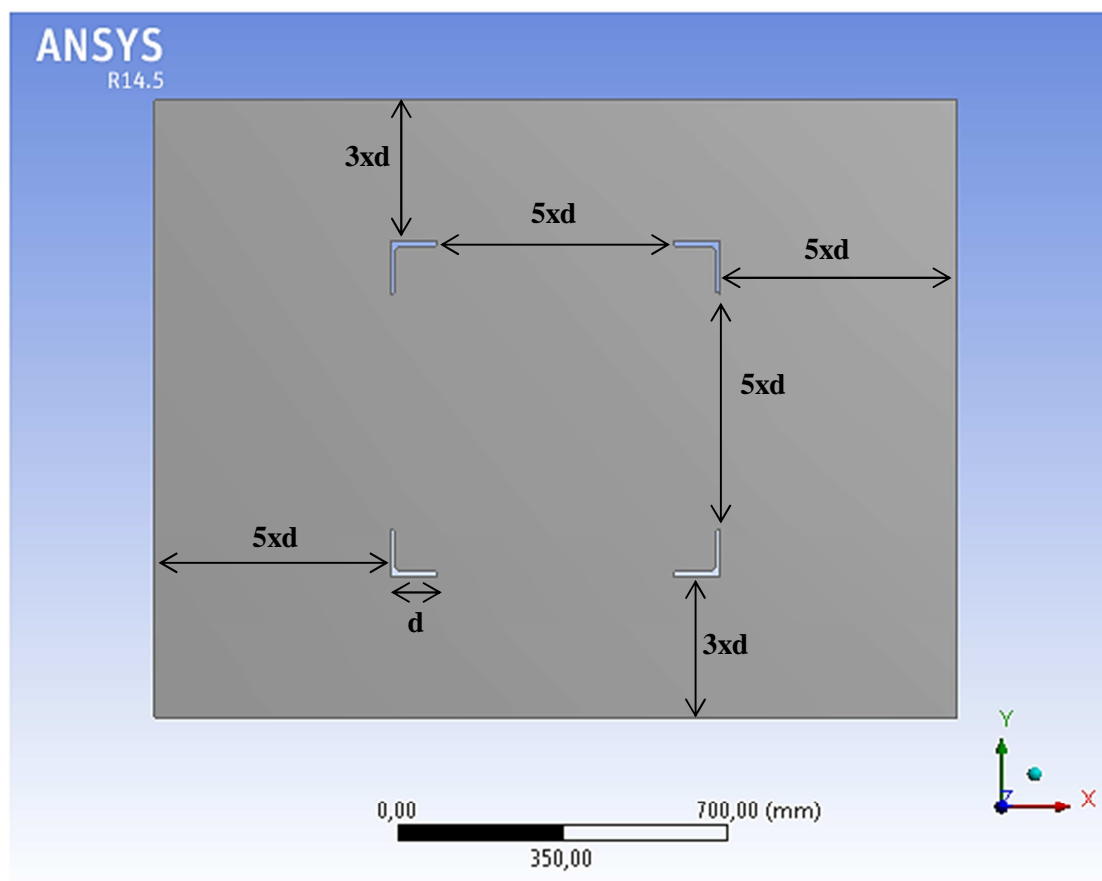
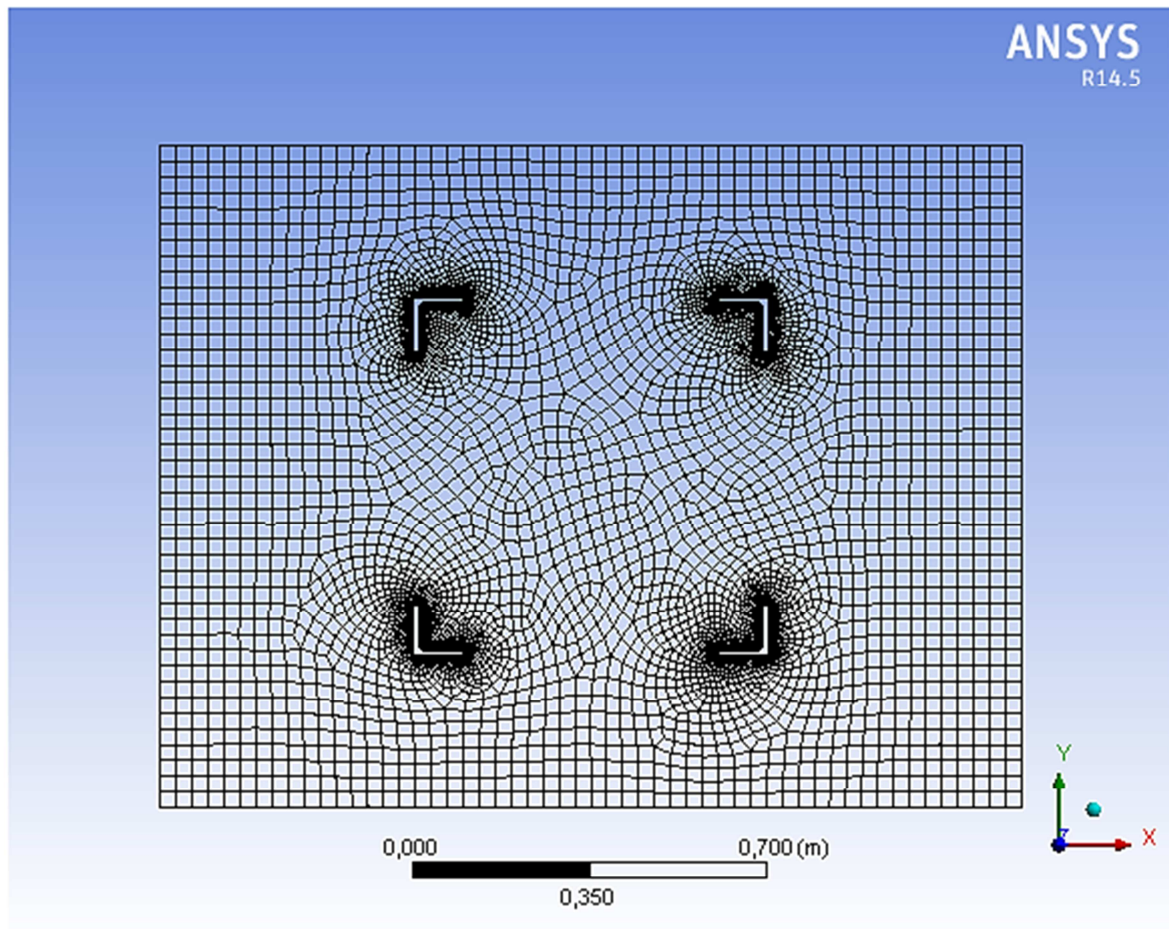


Fig.3.22 – Domínio integração *Ansys Fluent*, com as distâncias em função da aba da secção

Adotamos a distância entre secções de cinco vezes o comprimento da aba, admitindo ser o espaçamento mínimo plausível para a simulação de uma base de um torre treliçada.

### 3.8.2. CRIAÇÃO E PROPRIEDADES DA MALHA

De acordo com as propriedades adotadas no subcapítulo 3.6.3, na Fig.3.23 é apresentada a malha gerada para o domínio integração da Fig.3.22, os parâmetros de qualidade da malha obtidos são apresentados no quadro 3.9.

Fig.3.23 – Malha gerada no *ANSYS Meshing*

Quadro 3.9 - Parâmetros de qualidade da malha

Parâmetros	
Número de Elementos	7095
Número de Nós	7505
<i>Element Quality</i>	80%
<i>Skewness</i>	0,69
<i>Aspect Ratio</i>	3.54

A malha gerada pelo *Ansys Meshing*, com a aplicação dos padrões usados nas análises anteriores, apresentou parâmetros de qualidade bastante razoáveis e dentro dos valores aconselhados pelo *Ansys Help* para obter resultados mais fidedignos. Verifica-se que no interior da secção bruta, constituída pelo agrupamento das quatro secções, são gerados elementos mais irregulares, que são justificados pela dificuldade de criar elementos quadriláteros na proximidade das extremidades das secções, visto apresentarem as arestas boleadas.



### 3.8.3. Modelação Ansys Fluent

A modelação deste caso tomou os mesmos pressupostos apresentados no subcapítulo 3.6.4, ou seja, mantiveram-se as mesmas propriedades do escoamento, as definições das condições de fronteira e o procedimento numérico para a resolução das equações de Navier-Stokes.

### 3.8.4. SIMULAÇÃO DO ESCOAMENTO

A simulação do escoamento foi realizada para os vários modelos de turbulência k- $\epsilon$ . No Quadro 3.10 apresentados os coeficientes de arrasto obtidos.

Quadro 3.10 – Coeficientes de arrasto em função do modelo de turbulência

		Cd
Ângulo de incidência		0°
Modelos Turbulência	Standard	3,94
	RNG	3,94
	Realizable	3,94

Mais uma vez, analisando os resultados obtidos, verifica-se que os modelos de turbulência, não influenciam os resultados finais. Na Fig.3.24, apresentamos as linhas de corrente que ser formam na simulação do escoamento em torno da estrutura.

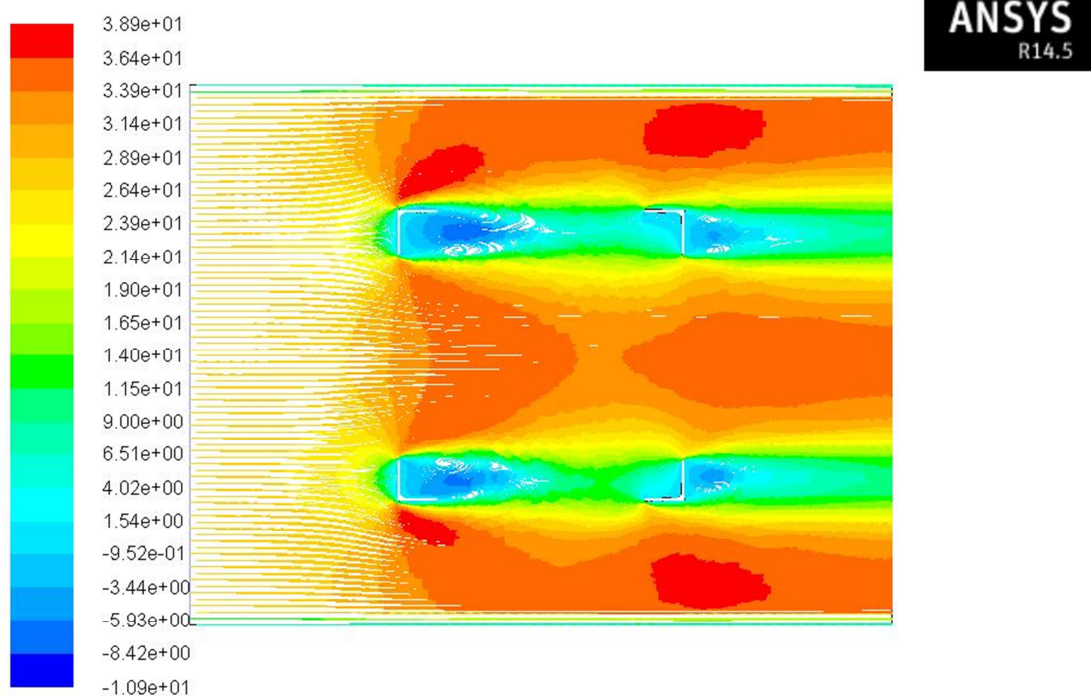


Fig.3.24 – Escoamento em torno da estrutura, observação das linhas de corrente



Analisando as linhas de corrente, provocadas pela velocidade na direção  $0^\circ$ , verificamos que existe uma separação do escoamento na direção YY, não observando interação dos fenómenos de recirculação entre as secções nessa direção. Este tipo de escoamento é o esperado que ocorra em estruturas treliçadas, visto ser uma estrutura vazada, não apresenta grande resistência ao vento, e quanto maior for a distância entre as secções mais independente será o escoamento em torno das secções. Num caso real, ainda se terá de contemplar as secções de contraventamento que foram excluídas neste estudo.

### 3.8.5. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

O objeto de comparação neste estudo foi a EN 1991-1-4[20]. Os passos a seguir na determinação do coeficiente de arrasto segundo a norma [20] estão apresentados no subcapítulo 3.54.

Um dos parâmetros a determinar é o índice de cheios que depende da área projetada da estrutura na direção do vento. Assim, no quadro 3.11, apresentamos os valores obtidos na determinação do índice de cheios,  $\phi$ , por metro de torre,  $L=1$  m.

Quadro 3.11 – Parâmetros obtidos na determinação do índice de cheios,  $\phi$ .

Parâmetros	
A	200 mm <sup>2</sup> /m
A <sub>c</sub>	700 mm <sup>2</sup> /m
$\phi$	0,29

O parâmetro relativo ao coeficiente de efeitos de extremidade, por opção, tomou o valor igual à unidade, valor conservativo.

Assim, analisando a Fig3.6 e substituindo os parâmetros da equação (3.5), retiramos o valor aproximado de **2.7** para o coeficiente de arrasto.

Comparativamente com o resultado obtido pela simulação CFD verifica-se que o valor se encontra acima do esperado cerca de 45%.

### 3.8.6. CONCLUSÃO

Para este caso em estudo, verificou-se que análise CFD gerou resultados acima do esperado, esta diferença pode ser justificada pela exclusão dos elementos de contraventamento assim como pela sensibilidade da análise com os efeitos causados de interação entre as secções e pelas recirculações internas a elas inerentes. *Este tipo de fenómenos provocam um efeito de válvula aumentando assim a força gerada pela ação do vento e consequentemente o coeficiente de arrasto.* Assim poder-se-á pensar que a norma EN 1991-1-4[20] poderá não contemplar completamente estes fenómenos, pelo facto dos resultados de casos apresentados divergirem cerca de 45% dos valores obtidos pela norma. Esta observação, que será referida também nas conclusões, indica a necessidade de posterior modelação CFD mais avançada (até eventual utilização de supercomputadores) face a algumas limitações dos meios disponíveis para a realização da presente dissertação.

### 3.9. CONCLUSÃO

O estudo do escoamento aerodinâmico em torno de uma secção angulosa permite-nos observar fenómenos de turbulência semelhantes aos esperados no estudo na torre treliça apresentado no capítulo 4. Um dos fenómenos mais observado é a criação de recirculações/vórtices do fluido que ocorrem a montante das secções. Estes tipos de fenómenos tornam-se relevantes nos resultados obtidos, principalmente no estudo de secções em grupo, influenciando assim as forças de arrasto geradas na superfície das secções.

Um dos principais parâmetros a ter em conta na simulação pelo *Ansys Fluent* é a criação do domínio de integração da superfície em estudo e os padrões a ter em conta na geração da malha. Devemos procurar sempre criar limites de integração que não condicionem o livre escoamento do fluido sem ocorrer efeitos de parede nos limites de integração, efeitos que provocam o aumento da força gerada pela ação do vento e consequentemente geram coeficientes de arrasto longe dos esperados. Verificou-se ainda que a geração da malha é um dos parâmetros com maior relevância na simulação, gerando divergência de resultados na alteração de alguns padrões na sua geração. Neste estudo procurou-se usar padrões na sua geração que resultasse numa malha com elementos uniformes na zona de entrada e saída do escoamento e elementos mais refinados na vizinha das secções. O estudo da malha torna-se um parâmetro de enorme relevância e complexidade na simulação pelo *Ansys Fluent* podendo-se tornar uma objeto de estudo em trabalhos futuros.

Da observação dos vários casos de estudo, verificou-se que os modelos de turbulência não causaram qualquer influência, relevante, nos resultados finais. Inicialmente era esperado que o modelo *Realizable* apresentasse resultados mais próximos da realidade, o que não se veio a verificar. Ainda assim o *Ansys Fluent* desaconselha a utilização do modelo *Standard* em elementos de geometria mais complexa, devido a não ser tão preciso na análise dos vórtices e na formulação da viscosidade turbulenta, o que resulta num cálculo exagerado dos valores da energia cinética turbulenta.

Como conclusão geral deste capítulo podemos afirmar que a análise CFD pelo *Ansys Fluent* se mostrou importante na análise dos escoamentos, apresentando linhas de corrente de elevada precisão, podendo-se observar os vários fenómenos que ocorrem nas zonas contíguas das secções e assim localizar os “*HotSpots*”, locais onde se geram elevadas pressões. Este estudo relevou-se ainda eficaz na determinação dos coeficientes de arrasto gerados, à exceção no caso do estudo de uma estrutura treliçada espacial.

## 4

## ESTUDO AERODINÂMICO DE UMA TORRE TRELIÇADA ESPACIAL SEGUNDO O EUROCÓDIGO E CFD

### 4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo estudamos a aerodinâmica de uma torre treliçada, onde serão observados os deslocamentos e reações causados pela ação do vento, segundo a metodologia apresentada pela EN 1991-1-4 [20], através de uma análise estática pelo *software Autodesk Robot Structural Analysis* e por uma análise CFD através do *software SolidWorks*. Inicialmente apresenta-se a abordagem da norma EN 1993-3-1[21] na determinação da ação do vento para torres.

Devido a algumas limitações encontradas na simulação da ação do vento, em altura, pelo *Ansys Fluent*, neste capítulo resolveu-se usar o *software SolidWorks* para a simulação CFD, visto poder usar uma descrição do vento em altura, podendo assim realizar uma simulação da ação do vento mais próxima da realidade.

### 4.2. DETERMINAÇÃO DA AÇÃO DO VENTO

#### 4.2.1. PRESSÃO DO VENTO DE ACORDO COM O EUROCÓDIGO EN 1991-1-4.

No que se refere ao zoneamento do território nacional a norma [20] considera o País dividido em duas zonas distintas, tal como se pode ver no quadro seguinte,

Quadro 4.1 – Zoneamento do território [20]

Zona A	A generalidade do território, exceto as regiões pertencentes à zona B.
Zona B	Os arquipélagos dos Açores e da Madeira e as regiões do continente situadas numa faixa costeira com 5 km de largura, ou a altitudes superiores a 600 m.

As velocidades de referência do vento são valores característicos cuja probabilidade anual de serem excedidos é igual a 0,02, o que equivale a um período médio de retorno de 50 anos[20].

O perfil de velocidades médias, do tipo logarítmico, corresponde a um terreno de categoria II, conforme definido na norma, a qual assume o papel de referência.

De acordo com a norma[20], o valor básico da velocidade de referência do vento, é o valor característico da velocidade média do vento referida a períodos de 10 min, independentemente da direção do vento e da época do ano, a uma altura de 10 m acima do nível do solo em terreno do tipo campo aberto, com vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura.

Os valores básicos da velocidade de referência do vento são dados em função da zona do território, como podemos observar no quadro 4.2.

Quadro 4.2 – Valor básico da velocidade de referência do vento [20]

Zona	$V_{b,0}$ [m/s]
A	27
B	30

O valor de referência da velocidade do vento,  $v_b$ , é calculado através do valor básico de referência,  $v_{b,0}$ , afetado pelos coeficientes de direção,  $c_{dir}$ , e de sazão,  $c_{season}$ , tal como indica a seguinte expressão,

$$v_b = c_{season} \cdot c_{dir} \cdot v_{b,0} \quad (4.1)$$

Os valores tomados, tanto para o coeficiente de direção como o coeficiente de sazão, excluindo casos particulares, assumem o valor de **1**, recomendado pelo Anexo Nacional do presente código.

A velocidade média do vento a uma altura  $z$  acima do solo,  $v_m(z)$ , depende da rugosidade do terreno,  $c_r$ , da orografia,  $c_o$ , e do valor de referência da velocidade do vento,  $v_b$ , e deverá ser determinado através da seguinte expressão,

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b \quad (4.2)$$

O coeficiente de orográfica tomou o valor igual à unidade, **1**, desprezando assim os efeitos orográficos.

O coeficiente de rugosidade tem em conta a variabilidade da velocidade média do vento no local da construção em resultado da altura acima do nível do solo e da rugosidade do terreno a barlavento da construção na direção do vento considerada.

O seu valor é determinado pela seguinte expressão, que se baseia num perfil de velocidades logarítmico,

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4.3)$$

$$c_r(z) = c_r(z_{\min}) \quad \text{para } z \leq z_{\min}$$

O comprimento de rugosidade,  $z_0$ , e a altura mínima,  $z_{\min}$ , são obtidos no Quadro 4.3.

O coeficiente de terreno,  $k_r$ , depende do comprimento de rugosidade,  $z_0$ , e é obtido através da seguinte expressão,

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (4.4)$$

Quadro 4.3 – Categoria e parâmetros de terreno[20]

Categoria do terreno		$z_0$ [m]	$z_{\min}$ [m]
I	Zona costeira, exposta aos ventos do mar.	0,005	1
II	Zona de vegetação rasteira, tal como erva, e obstáculos isolados (árvores, edifícios) com separações entre si de, pelo menos, 20 vezes a sua altura.	0,05	3
III	Zona com uma cobertura regular de vegetação ou edifícios, ou com obstáculos isolados com separações entre si de, no máximo, 20 vezes a sua altura (por exemplo, aldeias, zonas suburbanas, florestas permanentes).	0,3	8
IV	Zona na qual pelo menos 15% da superfície está coberta por edifícios com uma altura média superior a 15m.	1	15

A intensidade da turbulência,  $I_v$ , é definida como o quociente entre o desvio padrão da turbulência e a velocidade média do vento, e é obtida pela seguinte expressão,

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_o \cdot \ln(z/z_0)} \quad \text{para } z_{\min} \leq z \leq z_{\max} \quad (4.5)$$

$$I_v(z) = I_v(z_{\min}) \quad \text{para } z \leq z_{\min}$$

O valor recomendado, segundo o Anexo Nacional do presente código, para o coeficiente de turbulência,  $k_I$ , é igual a **1**.

A pressão dinâmica de pico,  $q_p$ , resulta da velocidade média e das flutuações de curta duração da velocidade do vento, sendo calculada pela seguinte expressão,

$$q_p = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) \quad (4.6)$$

Onde, o valor de  $\rho$  recomendado é igual a 1,25 kg/m<sup>3</sup>.

O coeficiente de exposição,  $c_e$ , calculado na expressão 4.7, representa o quociente entre a pressão dinâmica de pico,  $q_p$ , e a pressão dinâmica de referência,  $q_b$ , calculado na expressão 4.8.

$$c_e(z) = \frac{q_p(z)}{q_b} \quad (4.7)$$

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \quad (4.8)$$

O coeficiente de exposição,  $c_e$ , é uma quantidade adimensional que caracteriza a amplificação do vento a uma dada cota, incluindo a componente flutuante.

Na Fig.4.1, podemos observar o coeficiente de exposição, em função da altura, para o caso de um terreno plano em que  $c_o(z)=1$  para todas as categorias de terreno definidas no Quadro 4.3.

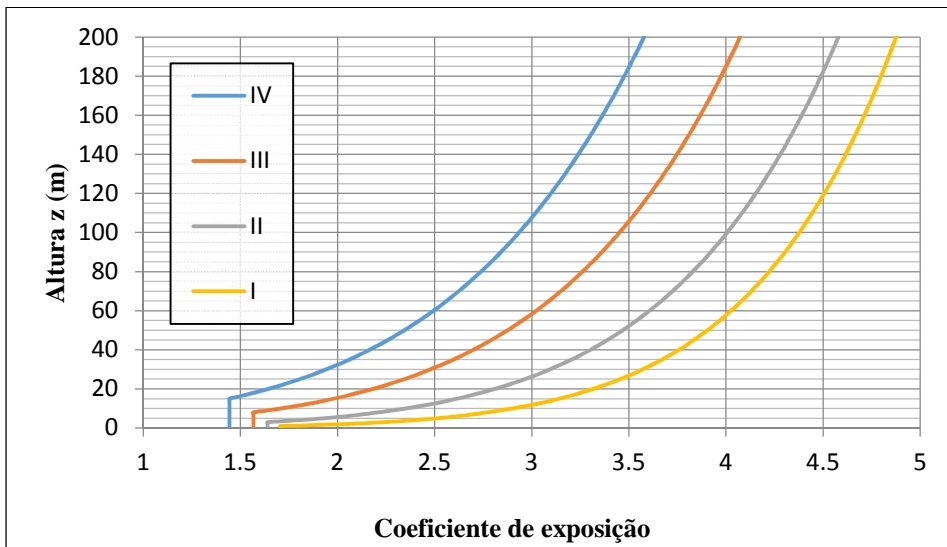


Fig.4.1 – Coeficiente de exposição em função da altura[23]

A força média do vento, sobre a estrutura, deverá ser calculada pela seguinte expressão,

$$F_{m,w}(z) = \frac{q_p}{1 + 7 \cdot I_v(z_e)} \sum c_f \cdot A_{ref} \quad (4.9)$$

A força de rajada na direção do vento, sobre a torre, deverá ser tomada de acordo com a seguinte expressão,

$$F_{T,W}(z) = F_{m,W}(z) \cdot \left[ 1 + \left[ 1 + 0,2 \cdot \left( \frac{z_m}{h} \right)^2 \right] \cdot \frac{[1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot c_s c_d - 1}{c_o(z_m)} \right] \quad (4.10)$$

#### 4.2.2. COEFICIENTE DE FORÇA DE ACORDO A EN 1993-3-1.

Para o cálculo da ação do vento sobre a estrutura, esta deverá ser dividida em várias secções. Esta divisão deverá ser realizada de forma apropriada de maneira a ser conseguida uma ação do vento adequada.

A determinação dos coeficientes de força aplicáveis a torres será de acordo com a norma EN 1993-3-1 [21].

O coeficiente de força,  $c_f$ , na direção do vento, ao longo de uma secção da estrutura, é dado pela seguinte expressão,

$$c_f = c_{f,S} + c_{f,A} \quad (4.11)$$

Onde, o  $c_{f,S}$  é o coeficiente de força aplicável à estrutura e  $c_{f,A}$  é o coeficiente de força dos elementos não estruturais.

De acordo com o caso em estudo, o coeficiente de força  $c_{f,A}$  será desprezado.

A Fig.4.2 foi retirada da norma EN 1993-3-1[21] sendo uma boa ajuda para o cálculo dos coeficientes de força.

O coeficiente de força  $c_{f,S}$  aplicável a torres treliçadas de base quadrada e triangular equilátera com áreas iguais em cada face é determinado pela seguinte expressão,

$$c_{f,S} = K_\theta \cdot c_{f,S,0} \quad (4.12)$$

Onde,  $K_\theta$  o fator de incidência do vento e é determinado em função da base da torre treliçada. Para torres treliçadas de base quadrada este é obtido pela expressão 4.13 e para torres treliçadas de base triangular equilátera obtém-se pela expressão 4.14. O fator de incidência,  $K_\theta$ , pode ser ainda conseguido aproximadamente através da Fig.4.3, que é um ábaco presente na norma [21].

$$K_\theta = 1 + K_1 \cdot K_2 \cdot \sin^2(2 \cdot \theta) \quad (4.13)$$

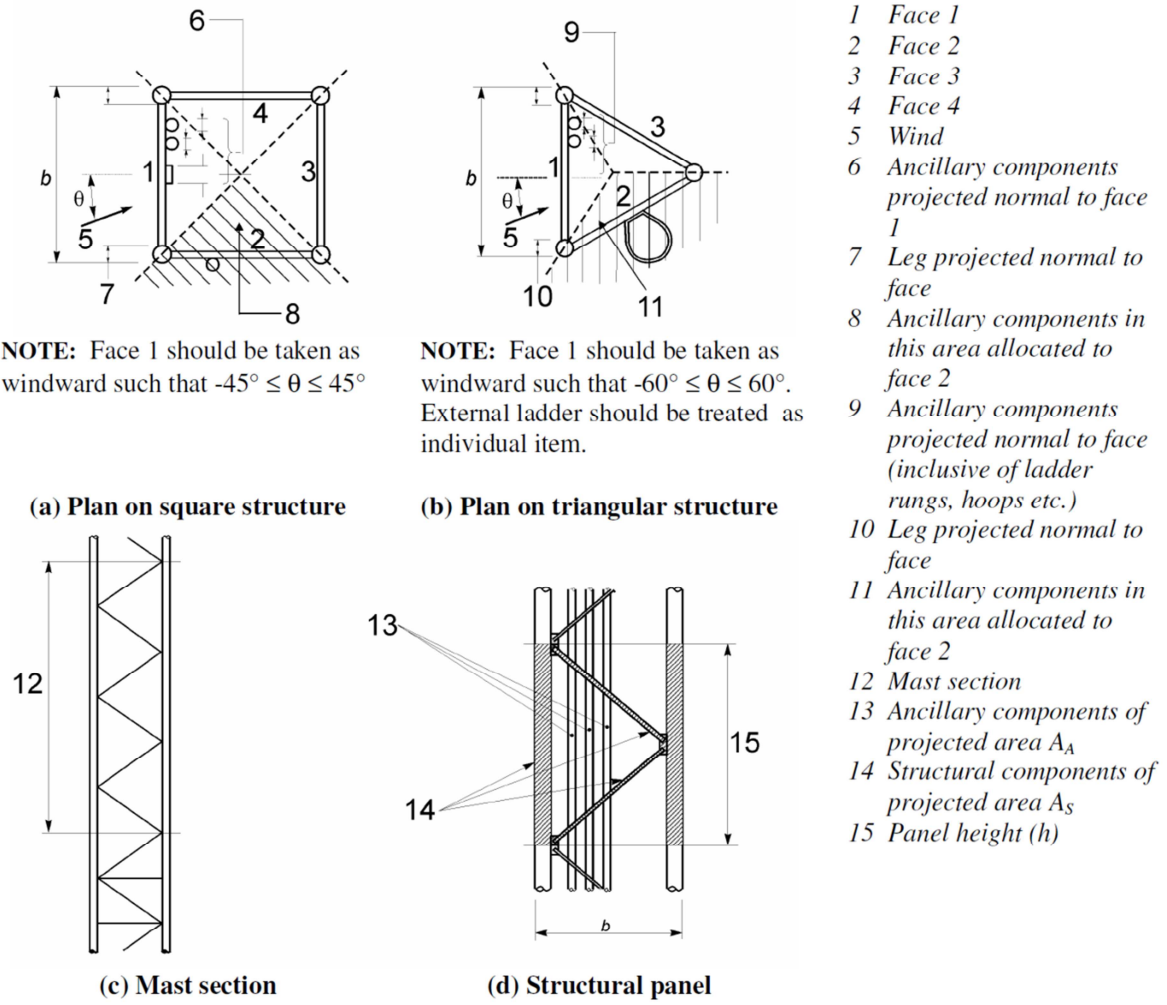


Fig.4.2 – Área projetada dos painéis, adaptada de [21]

O coeficiente de força  $c_{f,S}$  aplicável a torres treliçadas de base quadrada e triangular equilátera com áreas iguais em cada face é determinado pela seguinte expressão,

$$c_{f,S} = K_\theta \cdot c_{f,S,0} \quad (4.14)$$

Onde,  $K_\theta$  o fator de incidência do vento e é determinado em função da base da torre treliçada. Para torres treliçadas de base quadrada este é obtido pela expressão (4.13) e para torres treliçadas de base triangular equilátera obtém-se pela expressão (4.14). O fator de incidência,  $K_\theta$ , pode ser ainda conseguido aproximadamente através da Fig.4.3, que é um ábaco presente na norma [21].

$$K_\theta = 1 + K_1 \cdot K_2 \cdot \sin^2(2 \cdot \theta) \quad (4.15)$$



$$K_{\theta} = \frac{A_c + A_{c,sup}}{A_s} + \frac{A_f}{A_s} \cdot [1 - 0,1 \cdot \sin^2(1,5 \cdot \theta)] \quad (4.16)$$

Em que os fatores  $K_1$  e  $K_2$  são obtidos pelas expressões 4.15 e 4.16, respetivamente.

$$K_1 = \frac{0,55 \cdot A_f}{A_s} + \frac{0,8 \cdot (A_c + A_{c,sup})}{A_s} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} K_2 &= 0,2 \text{ se } 0 \leq \varphi \leq 0,2 \text{ e } 0,8 \leq \varphi \leq 1,0 \\ K_2 &= \varphi \text{ se } 0,2 < \varphi \leq 0,5 \\ K_2 &= 1 - \varphi \text{ se } 0,5 < \varphi < 0,8 \end{aligned} \quad (4.18)$$

Nas expressões apresentadas,  $\theta$  é o ângulo de incidência do vento, no plano, como se pode ver na Fig.4.2,  $A_f$  é o total da área projetada para elementos de secção angular,  $A_{c,sup}$  é o total de área projetada para elementos de secção circular em regime supercrítico e  $A_c$  é o total de área projetada para elementos de secção circular em regime subcrítico.

Sendo  $A_s$  a soma das três parcelas de área projetada acima descritas,  $A_f$ ,  $A_c$  e  $A_{c,sup}$ .

O índice de cheios,  $\varphi$ , é calculado de acordo com a norma [20] onde já foi apresentado no Capítulo 3, pela expressão 3.6 e auxiliado pela Fig.3.7.

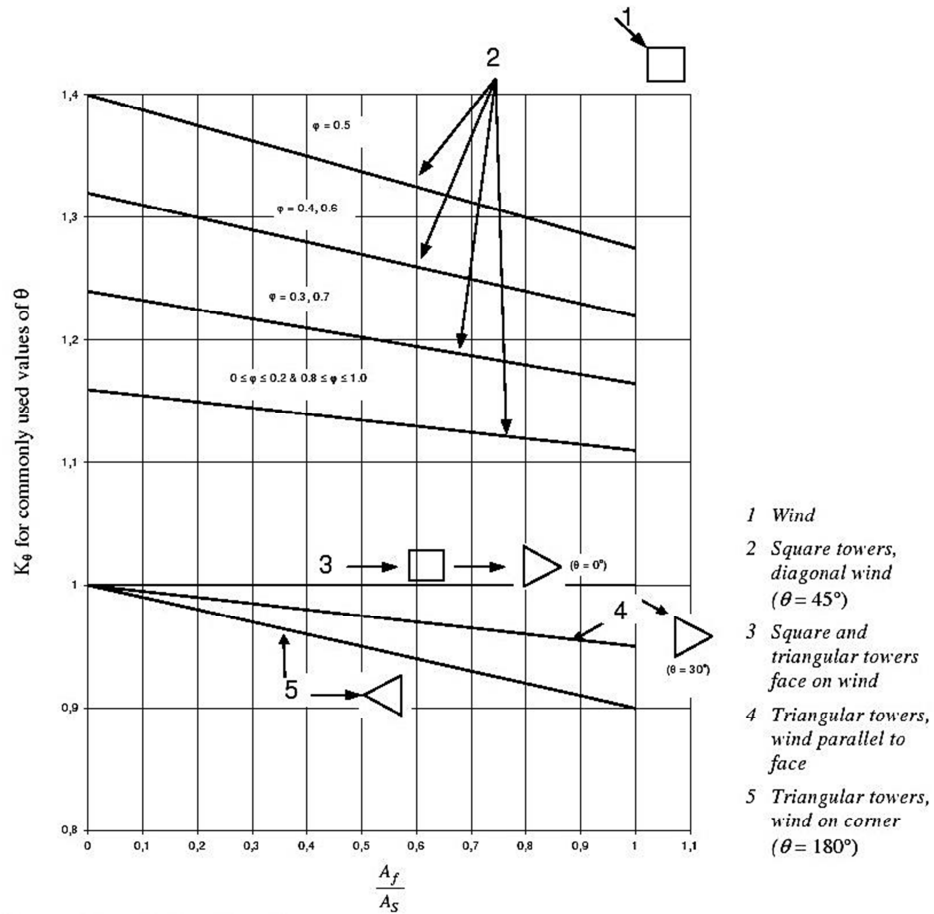


Fig.4.3 – Fatores de incidência do vento mais comuns, adaptado de [21]

O coeficiente de força normal,  $c_{f,s,0}$ , a que já foi feita referência na expressão 4.12, aplicável a torres treliçadas de base quadrada ou triangular equilátera, é obtido através da expressão 4.17 para uma dada secção  $j$ . Na Fig.4.4 apresentamos uma forma expedita de determinar o  $c_{f,s,0}$ , em função do  $\varphi$ .

$$c_{f,s,0,j} = c_{f,0,f} \cdot \frac{A_f}{A_s} + c_{f,0,c} \cdot \frac{A_c}{A_s} + c_{f,0,c,sup} \cdot \frac{A_{c,sup}}{A_s} \quad (4.17)$$

Sendo os coeficientes de força para elementos de secção angular, caso de estudo, são determinados pela seguinte expressão,

$$c_{f,0,f} = 1,76 \cdot C_1 \cdot [1 - C_2 \cdot \varphi + \varphi^2] \quad (4.18)$$

Onde os coeficientes  $C_1$  e  $C_2$  são dados em função da base, retirados do seguinte quadro,

Quadro 4.4 – Coeficiente $C_1$ , $C_2$	
$C_1$	2,25 para base quadrada
	1,90 para base triangular
$C_2$	1,50 para base quadrada
	1,40 para base triangular

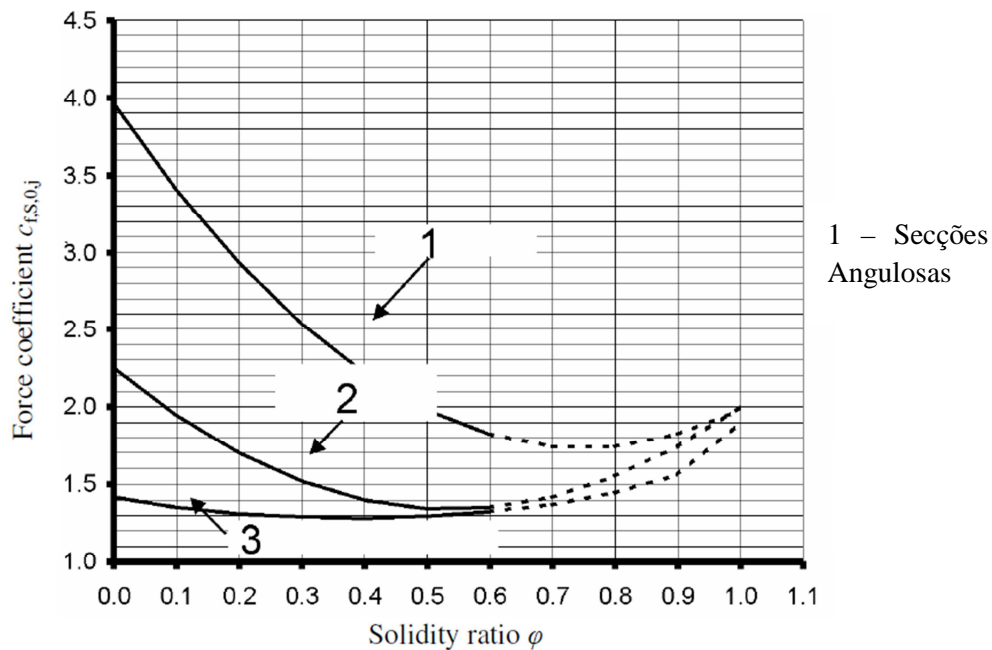


Fig.4.4 – Coeficiente de força normal,  $c_{f,s,0}$ , para estruturas de base quadrada, adaptado de [21]

O coeficiente de força para elementos não estruturais, já referido na expressão 4.11, como foi indicado, será desprezado neste caso de estudo. Mesmo assim aqui ficam os passos a seguir para a sua determinação. O seu valor é determinado pela seguinte expressão,

$$c_{f,A} = c_{f,A,0} \cdot K_A \cdot \sin^2 \psi \quad (4.19)$$

Onde,

$c_{f,A,0}$  Coeficiente de forma apropriado para elementos tendo em conta o número de Reynold efetivo e dado pela Fig.4.6 para membros individuais isolados ou determinado de acordo com o disposto em B.2.7.2 da EN 1993-3-1 para partes compostas de barras isoladas;

$K_A$  Coeficiente de redução para ter em conta a proteção dada pela estrutura, ou seja, quando a estrutura está na frente do elemento. O valor do coeficiente é dado na Fig.4.5, retirado da EN 1993-3-1;

$\psi$  Ângulo de incidência do vento segundo o eixo longitudinal de qualquer membro linear.

Position of ancillaries	Reduction factor, $K_A$	
	Square or rectangular plan form	Triangular plan form
Internal to the section	0,8	0,8
External to the section	0,8	0,8
<b>NOTE:</b> These values may be changed in the National Annex.		

Fig.4.5 – Coeficiente de redução de elementos não estruturais, adaptado de [21]

Member type	Effective Reynold's number Re (see EN 1991-1-4) (see NOTE 1)	Drag (pressure) coefficient $c_{f,A,0}$ or $c_{f,G}$	
		Ice-free	Iced
(a) Flat-sided sections and plates	All values	2,0	2,0
(b) Circular sections and smooth wire	$\leq 2 \times 10^5$	1,2	1,2
	$4 \times 10^5$	0,6	1,0
	$> 10 \times 10^5$	0,7	1,0
(c) Fine stranded cable, e.g. steel core aluminium round conductor, locked coil ropes, spiral steel strand with more than seven wires	Ice free: $\leq 6 \times 10^4$	1,2	
	$\geq 10^5$	0,9	
	Iced: $\leq 1 \times 10^5$		1,25
	$\geq 2 \times 10^5$		1,0
(d) Thick stranded cable, e.g. small wire ropes, round strand ropes, spiral steel strand with seven wires only (1 x 7)	Ice free: $\leq 4 \times 10^4$	1,3	
	$> 4 \times 10^4$	1,1	
	Iced: $\leq 1 \times 10^5$		1,25
	$\geq 2 \times 10^5$		1,0
(e) Cylinders with helical strakes of depth up to 0.12D (see NOTE 2)	All values	1,2	1,2
NOTE 1: For intermediate values of Re, $c_{f,A,0}$ should be obtained by linear interpolation.			
NOTE 2: These values are based on the overall width, including twice the strake depth.			
NOTE 3: The values for iced components are relevant for glazed ice; care should be exercised if they are used for rime ice (see ISO 12494).			
NOTE 4: These values may be changed in the National Annex.			

Fig.4.6 – Coeficiente típicos de componentes individuais, adaptado de [21]

#### 4.2.3. COEFICIENTE ESTRUTURAL DE ACORDO A EN 1991-1-4.

O coeficiente estrutural,  $c_s c_d$ , que tem em conta a probabilidade de ocorrência da pressão do vento de rajada ao longo de toda a estrutura,  $c_s$ , e o comportamento dinâmico da estrutura devido aos fenómenos de turbulência da ação do vento,  $c_d$ , é determinado de acordo com a norma [20], sendo dado pela seguinte expressão,

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)} \quad (4.20)$$

Onde,

- $z_s$  Altura de referência para a determinação do coeficiente estrutural, ver Fig.4.6;
- $k_p$  Fator de pico;
- $B^2$  Coeficiente de resposta quase-estática, que tem em conta a falta de total correlação das pressões sobre a superfície da estrutura;
- $R^2$  Coeficiente de resposta em ressonância, que tem em conta o efeito da turbulência em ressonância com o modo de vibração.

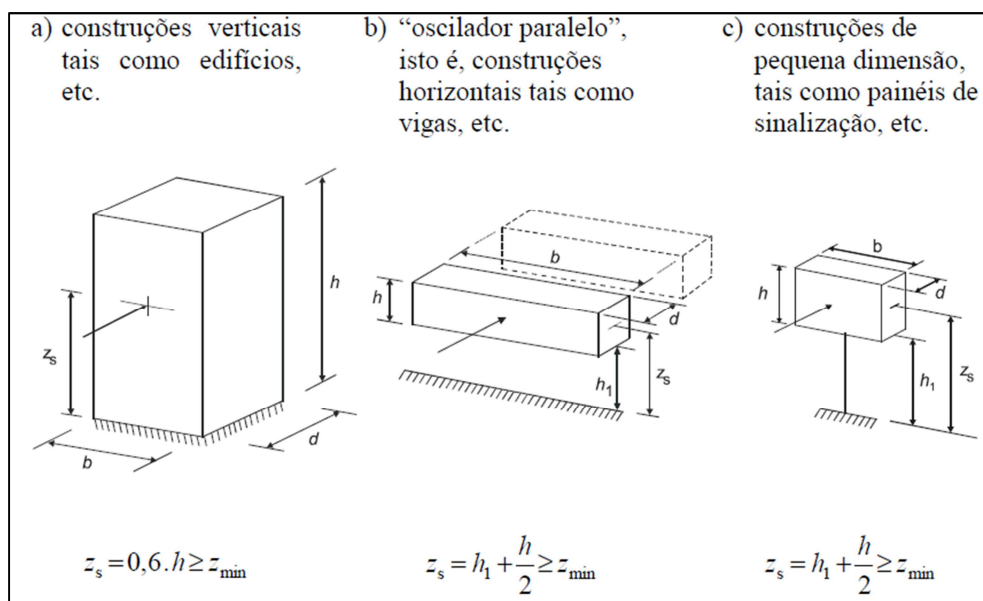


Fig.4.7 – Formas gerais das construções abrangidas pelo método de cálculo, adaptado de [20]

A norma [20] EN 1991-1-4 especifica dois procedimentos para o cálculo dos parâmetros necessários à determinação do coeficiente estrutural.

O procedimento do Anexo B e do Anexo C, no entanto a norma recomenda o procedimento 1 do Anexo B.

Assim sendo, será apenas utilizado apenas o procedimento 1 do Anexo B para o cálculo do coeficiente estrutural.

#### 4.2.3.1. Coeficiente de resposta quase estática

O coeficiente de resposta quase estática,  $B^2$ , é calculado através da seguinte expressão,

$$B^2 = \frac{1}{1 + 0,9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_s)}\right)^{0,63}} \quad (4.21)$$

Onde,

b, h Largura e altura da construção, ver Fig.4.7;

$L(z_s)$  Escala de turbulência, que representa a dimensão média dos turbilhões do vento natural, sendo calculada pela expressão (4.22).

$$L(z) = L_t \cdot \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha \quad \text{para } z \geq z_{min}$$

$$L(z) = L(z_{min}) \quad \text{para } z < z_{min} \quad (4.22)$$

Onde,  $z_t$  representa a altura de referência, com o valor de 200m,  $L_t$  é a escala de referência, com o valor de 300m, e com  $\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_0)$ , em que  $z_0$  e  $z_{min}$  são definidos no Quadro 4.3.

#### 4.2.3.2. Fator de pico

O fator de pico,  $k_p$ , é definido pelo rácio do valor máximo da parte variável da resposta e pelo seu desvio padrão. Está representado na Fig.4.8 e é determinado através da seguinte expressão,

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0,6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}} \quad (4.23)$$

ou  $k_p = 3$ , Considerando o maior dos valores.

Onde,

$v$  Frequência de passagens ascendentes, dada pela expressão 4.24;

$T$  Duração de integração da velocidade média do vento,  $T=600s$ .

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} ; \quad v \geq 0,08 \text{ Hz} \quad (4.24)$$

Em que  $n_{1,x}$  é a frequência própria da estrutura.

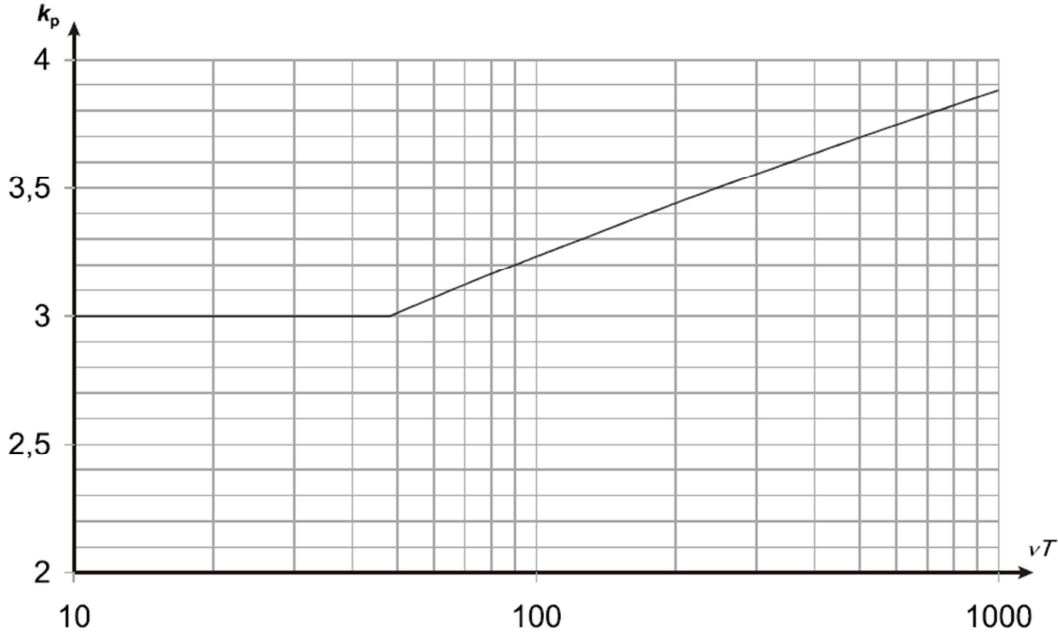


Fig.4.8 – Fator de pico, adaptado de [20]

#### 4.2.3.3. Coeficiente de resposta em ressonância

O coeficiente de resposta em ressonância,  $R^2$ , tem em conta o efeito da turbulência em ressonância com o modo de vibração considerado da estrutura, e é determinado através da seguinte expressão,

$$R^2 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \delta} \cdot S_L(z_s, n_{1,x}) \cdot R_h(\eta_h) \cdot R_b(\eta_b) \quad (4.25)$$

Onde,

$S_L$  Função de densidade espectral de potência adimensional, que expressa a distribuição da energia do vento em frequência, calculada pela expressão 4.26.

$R_h, R_b$  Funções de admitância aerodinâmica, calculadas pelas expressões 4.27 e 4.28, respetivamente.

$\delta$  Decremento logarítmico total de amortecimento, expressão 4.29.

$$S_L(z, n) = \frac{6,8 \cdot f_L(z, n)}{(1 + 10,2 \cdot f_L(z, n))^{5/3}} \quad (4.26)$$

Onde,

$f_L(z, n) = \frac{n \cdot L(z)}{v_m(z)}$  e  $n = n_{1,x}$  e representa a frequência própria da estrutura.

$$R_h = \frac{1}{\eta_h} - \frac{1}{2 \cdot \eta_h^2} (1 - e^{-2\eta_h}) \quad (4.27)$$

$$R_b = \frac{1}{\eta_b} - \frac{1}{2 \cdot \eta_b^2} (1 - e^{-2\eta_b}) \quad (4.28)$$

Onde,

$$\eta_h = \frac{4,6 \cdot h}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x}) \quad \text{e} \quad \eta_b = \frac{4,6 \cdot b}{L(z_s)} \cdot f_L(z_s, n_{1,x})$$

#### 4.2.3.4. Decremento logarítmico total de amortecimento

O decremento logarítmico total de amortecimento resulta da parcela de três componentes, sendo dado pela seguinte expressão,

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (4.29)$$

Onde,

- $\delta_s$  Decremento logarítmico de amortecimento estrutural, retirado da Fig.4.9;
- $\delta_a$  Decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico para o modo fundamental, calculado pela expressão 4.30;
- $\delta_d$  Decremento logarítmico de amortecimento devido a dispositivos especiais, tais como, *Tuned Mass Dumpers* (TMD), *tuned liquid dampers* (TLD) ou *sloshing tanks*. Este valor deverá ser obtido através de métodos adequados, teóricos ou experimentais. Neste caso de estudo será desprezado este parâmetro.

Exemplos práticos sobre a utilização de dispositivos especiais como TMD, como forma a limitar a ação dinâmica do vento, podem ser encontrados em Barros *et al.* [24], bem como em Barros e colaboradores [25-28].

O decremento logarítmico de amortecimento aerodinâmico para o modo fundamental de flexão poderá ser estimado através da seguinte expressão,

$$\delta_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e} \quad (4.30)$$

Onde,

- $c_f$  Coeficiente de força definido em 4.2.3;  
 $\rho$  Densidade do ar, assumindo o valor recomendado de 1,25 kg/m<sup>3</sup>;  
 $b$  Definido na Fig.4.7;  
 $n_1$  Frequência natural de vibração da estrutura no primeiro modo;  
 $m_e$  Massa equivalente por unidade de comprimento.

A massa equivalente por unidade de comprimento,  $m_e$ , relativa ao modo fundamental, é calculada pela seguinte expressão,

$$m_e = \frac{\int_0^l m(s) \cdot \Phi_1^2(s) ds}{\int_0^l \Phi_1^2(s) ds} \quad (4.31)$$

Onde,

- $m$  Massa por unidade de comprimento;  
 $l$  Altura da estrutura;  
 $\Phi_1$  Modo fundamental de flexão.

O modo fundamental de flexão para estruturas em consola poderá ser estimado através da seguinte expressão;

$$\Phi_1(z) = \left(\frac{z}{h}\right)^\xi \quad (4.32)$$

Em que,  $\xi$ , varia em função do tipo de estrutura, podendo o seu valor ser retirados do seguinte Quadro 4.5,

Quadro 4.5 – Valores de  $\xi$  [20]

$\xi$	Tipo de Estrutura
0,6	Estruturas porticadas esbeltas com elementos de revestimento ou paredes não resistentes;
1,0	Edifícios com um núcleo central complementado por pilares periféricos ou com pilares de maior dimensão complementados por elementos de contraventamento;
1,5	Edifícios em torre esbeltos e edifícios suportados por núcleos centrais de betão armado;
2,0	Torres e chaminés;
2,5	Torres de aço reticuladas.



Para este caso em estudo, foi adotado o valor para o  $\xi$  de 2,5, valor este que corresponde a Torres de aço reticuladas.

Tipo de estrutura		Amortecimento estrutural, $\delta_s$
edifícios de betão armado		0,10
edifícios de aço		0,05
estruturas mistas betão + aço		0,08
torres e chaminés de betão armado		0,03
chaminés de aço com ligações soldadas, sem revestimento interior e sem isolamento térmico exterior		0,012
chaminés de aço com ligações soldadas, sem revestimento interior e com isolamento térmico exterior		0,020
chaminé de aço com um forro de conduta e com isolamento térmico exterior <sup>a)</sup>	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b < 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,014
chaminé de aço com dois ou mais forros de conduta e com isolamento térmico exterior <sup>a)</sup>	$h/b < 18$	0,020
	$20 \leq h/b < 24$	0,040
	$h/b \geq 26$	0,025
chaminé de aço com forro de conduta em alvenaria de tijolo		0,070
chaminé de aço com argamassa projectada ("gunite") no interior		0,030
chaminés acopladas sem forro de conduta		0,015
chaminé de aço espiada sem forro de conduta		0,04
pontes de aço + torres de aço reticuladas	com ligações soldadas	0,02
	com ligações de parafusos de alta resistência	0,03
	com ligações de parafusos correntes	0,05
pontes mistas		0,04
pontes de betão	pré-esforçadas, sem fissuração	0,04
	com fissuração	0,10
pontes de madeira		0,06 - 0,12
pontes de ligas de alumínio		0,02
pontes de plástico reforçado com fibras ou vidro		0,04 - 0,08
cabos	de fios paralelos	0,006
	de cordões	0,020
NOTA: Os valores relativos a compósitos de matriz polimérica e madeira são apenas indicativos. Nos casos em que, no projecto, os efeitos aerodinâmicos se revelem significativos, é necessário obter informações mais precisas através de um parecer especializado (com o acordo, caso se aplique, da autoridade competente).		
<sup>a)</sup> Para valores intermédios de $h/b$ , poderá ser efectuada uma interpolação linear.		

Fig.4.9 – Valores aproximados do decremento logarítmico de amortecimento estrutural, adaptado de [20]

Para este caso em estudo, foi adotado o valor para o  $\delta_s$  de 0,02, correspondente a torres de aço reticuladas com ligações soldadas.

### 4.3. GEOMETRIA, MATERIAL, SECÇÕES E LIGAÇÕES ENTRE BARRAS

As torres metálicas podem ter diversas configurações em planta e em altura. Na grande maioria, as torres são estruturas treliçadas de base quadrangular e/ou retangular, constituídas por elementos de parede fina, normalmente cantoneiras ou, menos frequentemente, tubos metálicos. A torre que se pretende estudar foi dimensionada para resistir à ação do vento na zona A do território nacional e para um tipo de tipologia de terreno, tipo II. Para o cálculo dos esforços e deformações considerou-se a

combinação fundamental de ações, ELU<sup>3</sup>, “1.35Gk + 1.5Gk”, onde se considerou o peso próprio da estrutura e a massa localizada no topo como ações permanente e a ação do vento como ação variável.

Como se observa na Fig.4.10, foi adotada uma torre de base quadrada, constituída por elementos de parede fina, cantoneiras, a base da torre tem uma largura de 1000 mm, sendo a altura máxima da torre igual a 20000 mm. No topo da torre foi colocada uma massa de 2000 kg, não condicionando assim, a sua utilização futura e de forma a se obter uma frequência própria da estrutura para que esta fosse condicionada pela ação do vento, ver Fig.4.12.

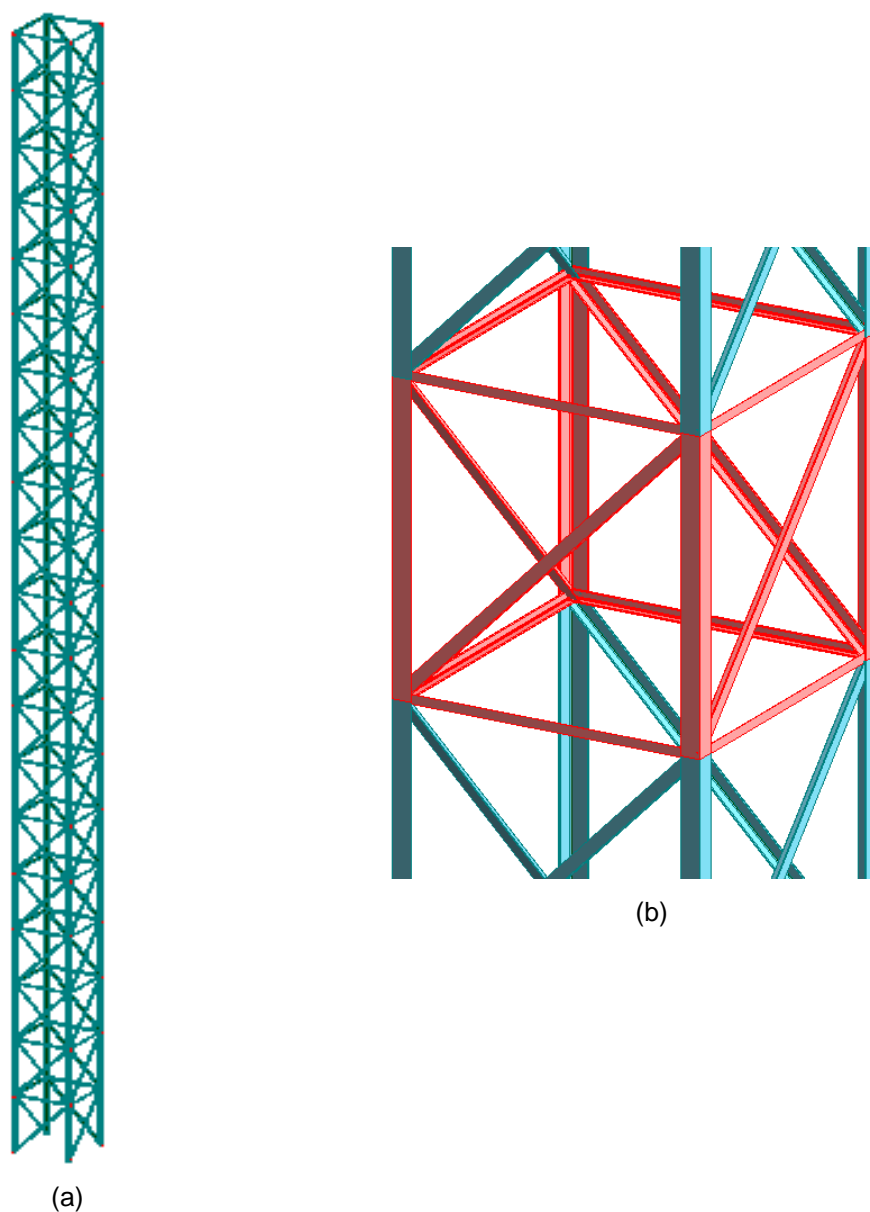


Fig.4.10 – Vista total, (a) e parcial (b) da torre treliçada, elementos principais e de travamento (modelo Robot)

<sup>3</sup> ELU – Estado Limite Ultimo

Na Fig.4.10 (b), visualizamos em pormenor os elementos de travamento adotados (diagonais e horizontais). Relativamente à configuração em altura a torre apresenta o mesmo formato apresentado na Fig.4.10.

A estrutura é constituída por perfis com secção em L (cantoneiras) de abas iguais. No total, utilizaram-se três secções de cantoneira. De forma a designar cada uma delas, utilizou-se a nomenclatura apresentada pelo *software Robot*, em que CAEP X x Y e SAEP X x X x Y designam o tipo de secção, o primeiro número é a largura das abas e o segundo número representa a sua espessura, à exceção das secções SAEP que o primeiro número e o segundo número é a largura das abas e o terceiro número representa a sua espessura (todos os valores em mm).

Na Fig.4.11 estão representados através de diferentes cores as barras com as três secções que constituem a torre. Por outro lado, também se verifica que os elementos verticais apresentam quase sempre maiores dimensões que os elementos restantes (diagonais e horizontais).

Todas as cantoneiras são constituídas pelo aço S355 (tensão de cedência de 355 MPa).

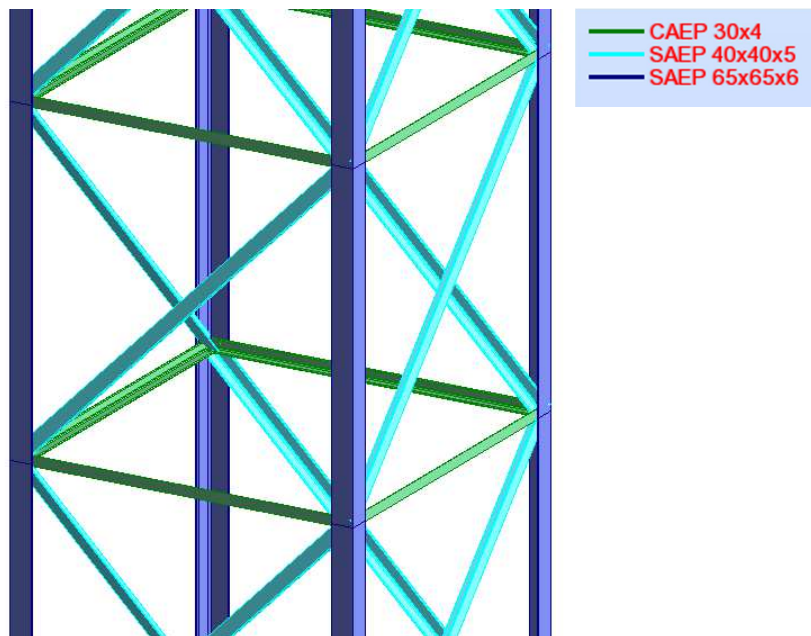


Fig.4.11 - Representação do tipo de perfis na torre

No que diz respeito às ligações, todas as cantoneiras foram soldadas, admitindo-se soldadora que assuma continuidade perfeita entre todas as cantoneiras.

#### 4.4. CÁLCULO DA AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA

A determinação da ação do vento tomou os passos apresentados no subcapítulo 4.2, em que se adotou que a torre estaria localizada numa zona A, ver quadro 4.1, numa tipologia de terreno tipo II, ver quadro 4.3. De forma a simplificar o cálculo, foi adotado um ângulo de incidência da ação do vento igual a 0°, ver Fig.4.2.

Para auxiliar o cálculo da ação do vento, foi realizada uma folha de cálculo automático no Microsoft Excel, que será apresentada em Anexo A.

#### 4.4.1. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE FORÇA DA ESTRUTURA

Tomando todas as considerações apresentadas no subcapítulo 4.2.2, chegou-se a um coeficiente de força para a torre, aproximadamente, de **2.86**. Todos os pormenores no cálculo do coeficiente de força são apresentados no Anexo A.

#### 4.4.2. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE ESTRUTURAL DA ESTRUTURA

De modo a estudar o comportamento dinâmico da estrutura, foi realizada uma análise modal pelo *software Robot*, onde se obteve a frequência própria da estrutura,  $f$ , igual a 0.80 Hz, que segundo Holmes [29], pode-se admitir que a ação do vento influencia o comportamento da torre, ver Fig.4.12.

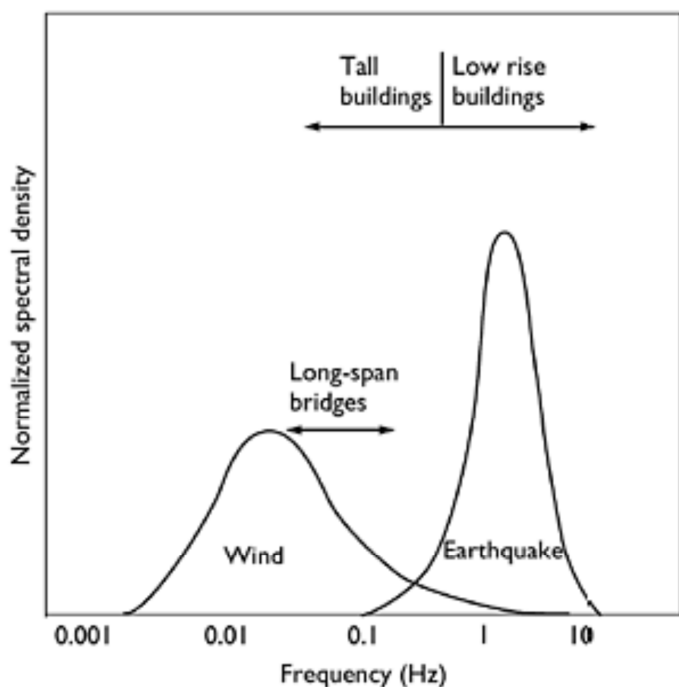


Fig.4.12 – Excitações provocadas a estruturas por ações dinâmicas, vento e sismo[29]

Da análise modal realizada, apresenta-se a deformada dos primeiros três modos de vibração da estrutura, Fig. 4.13, em que os primeiros dois correspondem a modos flexionais da estrutura e o terceiro a modo torsional da estrutura. Ainda para cada modo de vibração é apresentado no quadro 4.6, a massa modal mobilizada em cada um deles. Para este caso em estudo desprezou-se o efeito das excentricidades das massas.

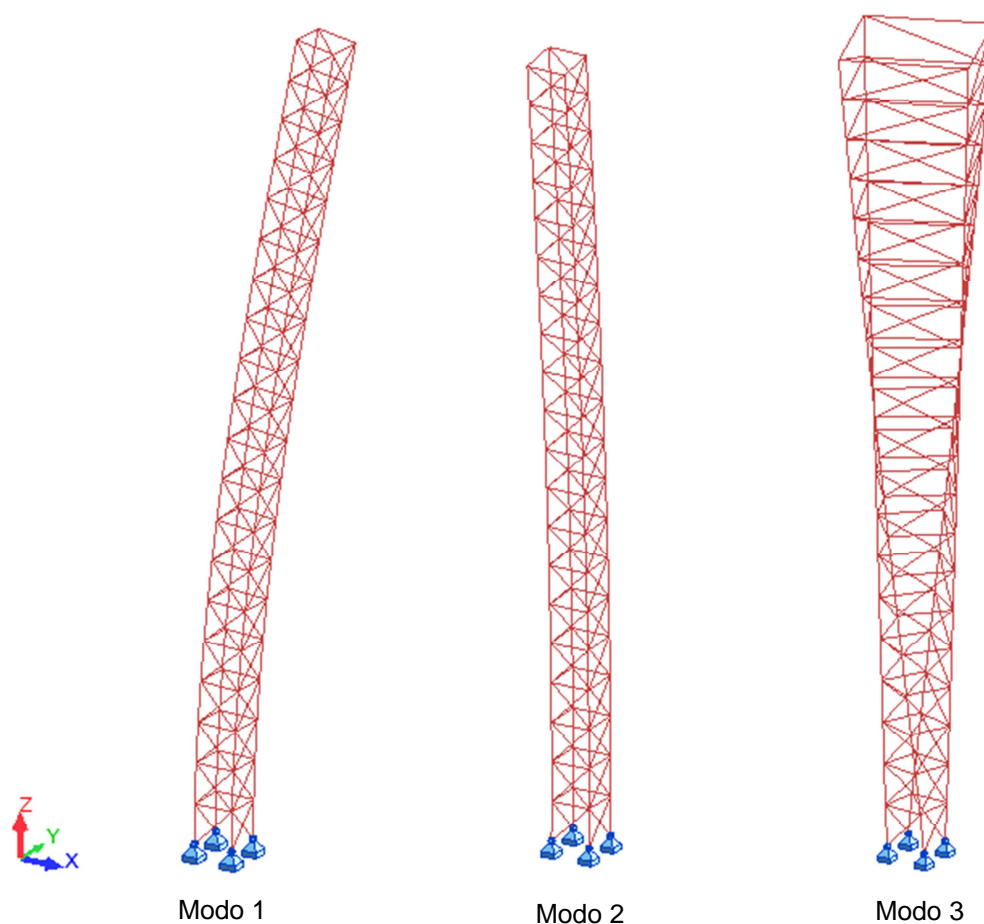


Fig.4.13 – Modos de vibração com deslocamento locais em mm (modelo Robot)

Quadro 4.6 – Resultados Análise Modal

Modo	Frequência (Hz)	Período (s)	% Massa Modal UX	% Massa Modal UY	% Massa Modal UZ
1	0,80	1,26	79,50	6,19	0,00
2	0,80	1,26	6,19	79,56	0,00
3	4,15	0,24	0,00	0,00	0,53

A massa modal mobilizada em cada modo é referente à massa total de **2964,99 Kg**.

Um dos parâmetros a ter em conta no cálculo do coeficiente estrutural é a massa equivalente por unidade de comprimento, que é influenciada pelo modo fundamental de flexão. Na determinação do modo fundamental de flexão, para além do apresentado pela norma[20], estudamos duas outras funções de forma, equação 4.33 e 4.34 que segundo Chopra [30] e Clough e Penzien [31], corresponde respetivamente a primeira a um comportamento ao corte da estrutura e a segunda a um comportamento à flexão da estrutura. Na Fig.4.14 apresentamos um gráfico comparativo entre os três casos.

$$\psi(x) = 1 - \cos \frac{\pi x}{2L} \quad (4.33)$$

$$\psi(x) = \sin \frac{\pi x}{2L} \quad (4.34)$$

Onde,

$\psi(x)$  Função de Forma;

$x$  Unidade de comprimento por metro de altura da estrutura;

$L$  Altura total da estrutura.

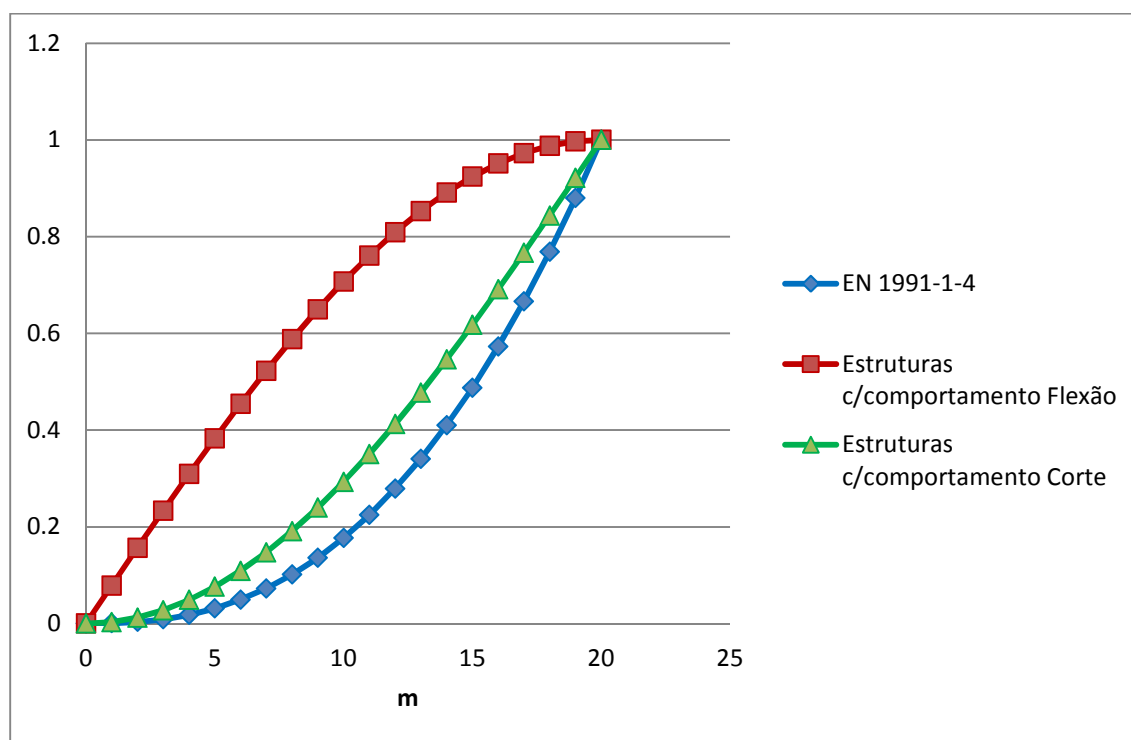


Fig.4.14 – Análise comparativa do modo fundamental de flexão

Analisando a Fig.4.14 verificamos que a estrutura apresenta um comportamento muito próximo ao de corte, o que seria de esperar, visto ser uma estrutura vazada com elementos esbeltos. Embora uma torre em consola tenha comportamento flexional, numa torre em consola treliçada o padrão de deslocamentos é fortemente condicionado pelas deformações por esforço transversal.

Para os três casos determinamos ainda as suas massas equivalentes por unidade de comprimento, quadro 4.7. Na resolução do integral no cálculo da massa equivalente por unidade de comprimento utilizou-se o método dos retângulos.

Quadro 4.7 – Comparação entre massas equivalentes por unidade de comprimento

	$m_e$
Norma[20]	576.70
Estruturas com comportamento de Flexão	241.78
Estruturas com comportamento de Corte	451.53

Com isto, apresentamos no quadro 4.8 o coeficiente estrutural gerado em função da massa equivalente apresentada no quadro 4.7.

Quadro 4.8 - Comparação entre coeficientes estruturais

	$C_s C_d$
Norma[20]	1.171
Estruturas com comportamento de Flexão	1.041
Estruturas com comportamento de Corte	1.129

Analisando o quadro 4.8, verificamos que a norma [20] apresenta resultados conservativos, comparativamente com os outros casos, utilizando assim o obtido pela norma[20], **1.171**.

Em relação ao coeficiente estrutural obtido, verifica-se que este amplifica a ação do vento, concluindo assim, como era de esperar, existir interação da torre perante a ação do vento. O cálculo detalhado do coeficiente estrutural encontra-se no Anexo A.

#### 4.4.3. DETERMINAÇÃO DA FORÇA DO VENTO

Realizando todos os procedimentos apresentados no subcapítulo 4.2, para o cálculo da força do vento, segundo a norma [20], é apresentado um quadro geral, ver quadro 4.9, uma discretização em altura, da torre, dos parâmetros, principais, obtidos para o cálculo da força do vento. O cálculo detalhado da ação do vento encontra-se no Anexo A.

#### 4.5. ANÁLISE ESTATICA DA AÇÃO VENTO NA ESTRUTURA

De modo a determinar os esforços e deformações causadas, na estrutura, pela ação do vento, recorreu-se a uma análise estática da ação do vento através da aplicação das forças,  $F_{T,w}$ , em cada nó da estrutura, obtidas no quadro 4.9.

A forças de rajada obtidas no quadro 4.9,  $F_{T,W}$ , foram determinadas já por módulos de um metro, o que facilitou a divisão das forças pelos nós da estrutura, no quadro 4.10 apresentamos as forças por módulo e por nó.

Quadro 4.9 – Quadro geral da ação do vento

Z (m)	$C_r(z)$	$V_m(Z)$ (m/s)	$I_v(Z)$	$q_p(z)$ (Pa)	$A_{ref}$ (m <sup>2</sup> )	$F_{m,W}(Z)$ (N)	$F_{T,W}(Z)$ (N)
1.00	0.78	21.00	0.24	747.14	0.22	170.65	541.67
2.00	0.78	21.00	0.24	747.14	0.22	170.65	541.81
3.00	0.78	21.00	0.24	747.14	0.22	170.65	542.04
4.00	0.83	22.48	0.23	820.37	0.22	195.48	595.51
5.00	0.88	23.62	0.22	879.05	0.22	215.89	638.57
6.00	0.91	24.56	0.21	928.21	0.22	233.32	674.87
7.00	0.94	25.35	0.20	970.62	0.22	248.59	706.43
8.00	0.96	26.04	0.20	1008.00	0.22	262.21	734.48
9.00	0.99	26.64	0.19	1041.45	0.22	274.52	759.85
10.00	1.01	27.18	0.19	1071.76	0.22	285.77	783.10
11.00	1.02	27.67	0.19	1099.50	0.22	296.14	804.64
12.00	1.04	28.12	0.18	1125.08	0.22	305.78	824.79
13.00	1.06	28.53	0.18	1148.83	0.22	314.77	843.77
14.00	1.07	28.91	0.18	1171.01	0.22	323.22	861.79
15.00	1.08	29.26	0.18	1191.82	0.22	331.18	878.98
16.00	1.10	29.59	0.17	1211.43	0.22	338.72	895.47
17.00	1.11	29.90	0.17	1229.97	0.22	345.88	911.37
18.00	1.12	30.20	0.17	1247.57	0.22	352.69	926.75
19.00	1.13	30.47	0.17	1264.31	0.22	359.20	941.69
20.00	1.14	30.74	0.17	1280.28	0.22	365.43	956.26
						$\Sigma$ 5560.76 N	$\Sigma$ 15363.83 N

Há que salientar que os apoios da torre no solo foram simulados por quatro ligações que impedem qualquer deslocamento mas deixam livres todas as rotações (apoios simples), ver Fig.4.15.



Quadro 4.10 – Cargas do vento aplicadas no Robot

Z (m)	$F_{T,W}$ (N)	Número de nós	$F_{T,W}$ (KN) "Robot"
1	541.67	4	0.14
2	541.81	4	0.14
3	542.04	4	0.14
4	595.51	4	0.15
5	638.57	4	0.16
6	674.87	4	0.17
7	706.43	4	0.18
8	734.48	4	0.18
9	759.85	4	0.19
10	783.10	4	0.20
11	804.64	4	0.20
12	824.79	4	0.21
13	843.77	4	0.21
14	861.79	4	0.22
15	878.98	4	0.22
16	895.47	4	0.22
17	911.37	4	0.23
18	926.75	4	0.23
19	941.69	4	0.24
20	956.26	4	0.24

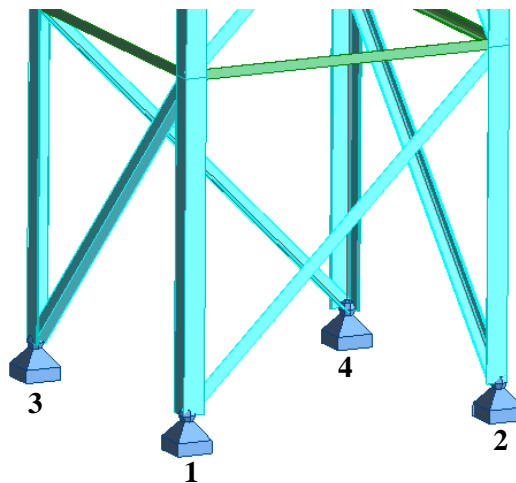


Fig.4.15 – Modelação adotada para os apoios

## 4.6. ANÁLISE CFD DA AÇÃO DO VENTO NA ESTRUTURA

Como já foi referido no subcapítulo 4.1, a análise CFD foi realizada através do *software Solidworks* comando *Flow Simulation*. Inicialmente e de forma a calibrar o *software*, para a análise CFD, optou-se por modelar um módulo, de um metro, da estrutura para posteriormente passar para à análise da estrutura completa.

Nos próximos subcapítulo serão apresentados os passos a ter em conta na modelação *Solidworks Flow Simulation*.

### 4.6.1. MODELAÇÃO DE UM MÓDULO DA ESTRUTURA

O SolidWorks usa um modelo de sólidos na criação da geometria das secções, onde posteriormente estes são posicionados em planos de forma a criar o modelo desejado.

Depois de o modelo criado, ver Fig.4.16, procedeu-se à modulação da geometria no *Flow Simulation*. Dentro das várias opções que o *Flow Simulation* apresenta, existe um comando automático *wizard* que permite criar um projeto de simulação CFD, seguindo os passos que ele apresenta. Nos subcapítulos seguintes são apresentadas as opções tomadas dentro do comando *wizard*.

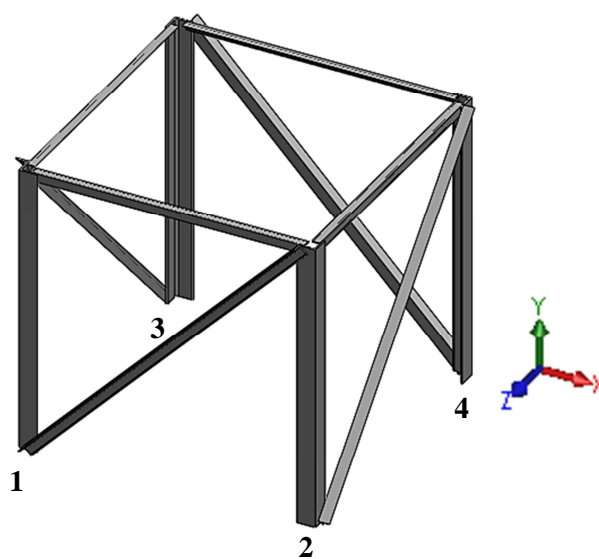


Fig.4.16 – Módulo da estrutura

#### 4.6.1.1. Simulação *Flow Simulation*

Dentro do comando *Wizard*, inicialmente é necessário definir o sistema de unidades a usar no projeto, de forma a estar coerente com as anteriores, definiu-se o sistema internacional, SI. Posteriormente é necessário definir o tipo de análise que pretende realizar, indicando as características físicas que se pretende incluir na simulação assim como o eixo em que será realizado o escoamento. Na Fig.4.17 apresentam-se as opções tomadas para este projeto.

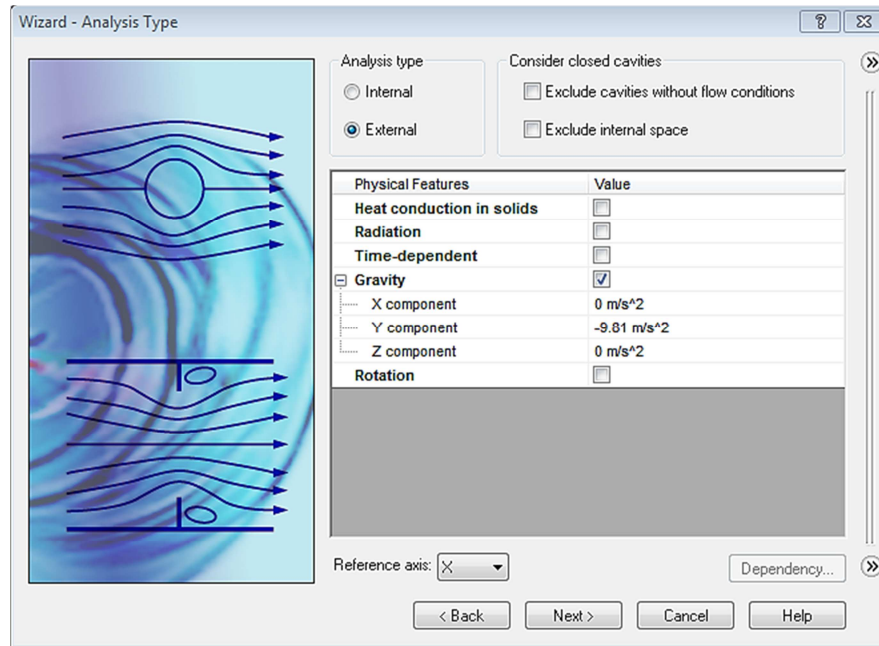


Fig.4.17 – Imagem do Comando *Wizard*, Tipo de análise

Para o estudo de fluxos aerodinâmicos, caso em estudo, considera-se um tipo de análise externa. Nesta análise optou-se por incluir unicamente a ação da gravidade no estudo do escoamento, visto apresentar, alguma influência para fluidos, gases, com números de Mach baixos, informação retirada da opção *Help* do *Fluid Flow*. Após definir o tipo de análise é necessário definir o tipo de fluido que se pretende estudar como as características do seu regime, ver Fig.4.18. O fluido em estudo é o ar, em regime turbulento. Por defeito o *Fluid Flow* assume um modelo k-ε, para escoamentos turbulentos, não especificando o modelo utilizado.

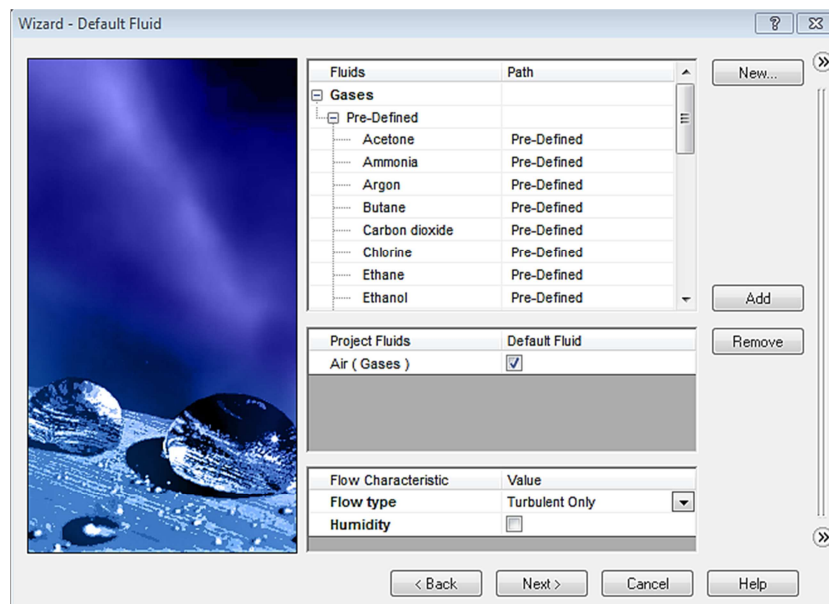


Fig.4.18 - Imagem do Comando *Wizard*, Tipo de fluido

Posteriormente à introdução do tipo de análise e do tipo de fluido é necessário definir as condições de parede da estrutura, assim como as condições iniciais e de ambiente do escoamento. Relativamente às

condições de parede, o *Fluid Flow* assume por defeito uma condição adiabática, ou seja, assume-se que o sistema se encontra isolado de quaisquer trocas de calor ou matéria com um meio externo, ver Fig.4.19. Em relação às condições iniciais e de ambiente, foram assumidos os parâmetros termodinâmicos apresentados por defeito pelo *Fluid Flow*, ver Fig.4.20. A velocidade de escoamento é de 21 m/s, velocidade retirada do quadro 4.8 relativa à altura de 1m (altura do modulo). Os parâmetros de turbulência utilizados foram o da intensidade e da largura, tomando os valores de 1% e 0.05m respetivamente, ver Fig.4.20.

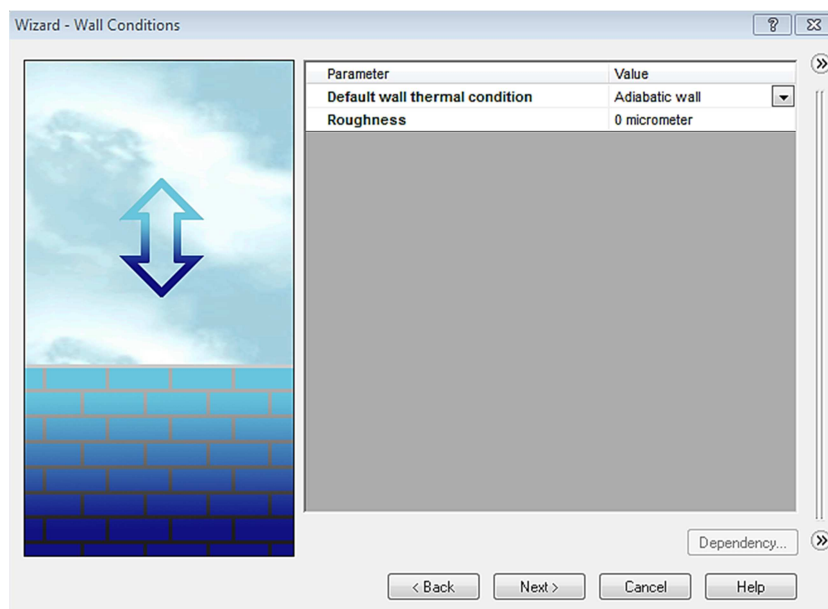


Fig.4.19 - Imagem do Comando *Wizard*, Condições de Parede

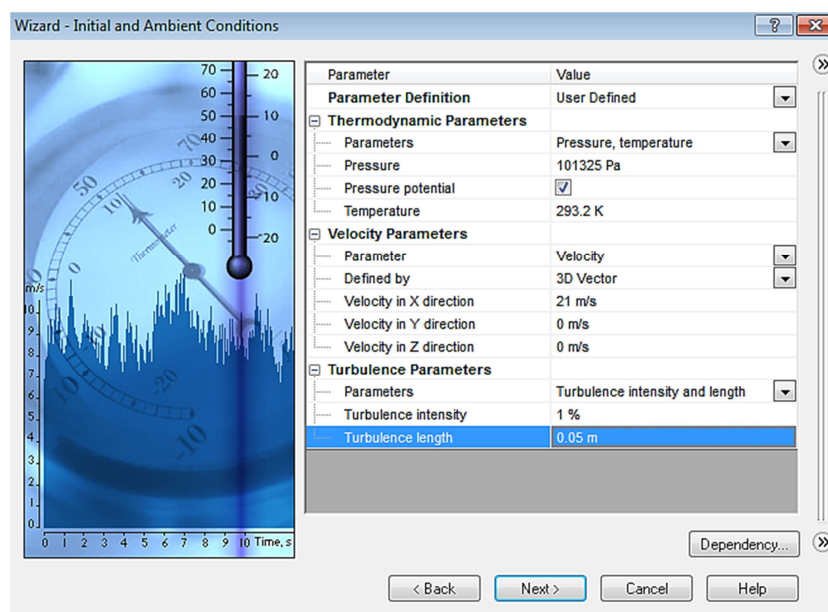


Fig.4.20 - Imagem do Comando *Wizard*, Condições Iniciais e de Ambiente

Antes de finalizar o projeto é necessário indicar o tipo de resolução que se pretende para os resultados e para a geometria, o tipo de resolução é apresentada a uma escala de valores que varia de 1 a 8, não aconselhando resoluções inferiores a 3, ver Fig.4.21. O tipo de resolução, influencia a qualidade da malha e por consequência a qualidade dos resultados. Para este estudo optou-se por uma resolução de grau 5, verificando não haver influencia nos resultados para graus mais elevados e aumentando somente o tempo de análise.

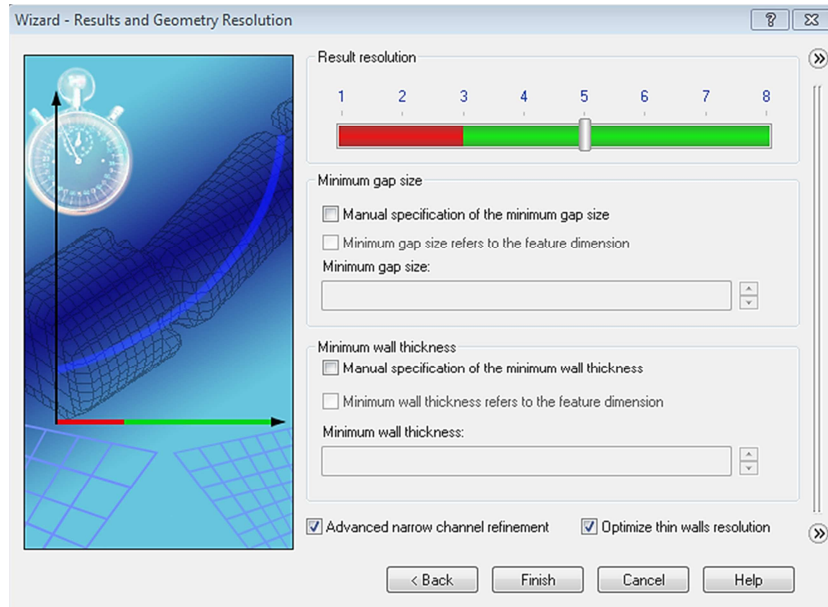
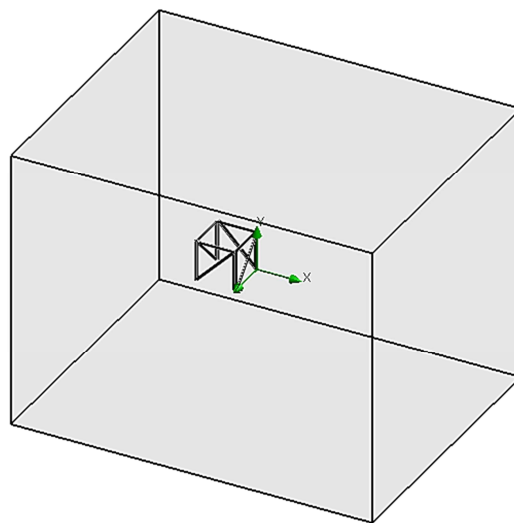








Fig.4.21 - Imagem do Comando Wizard, Resolução da Geometria e Resultados

#### 4.6.1.2. Características da Malha e do Domínio de Integração

Por defeito o *Fluid Flow* define o domínio de integração em função da geometria da estrutura, os mesmos mantiveram-se inalteráveis verificando ser suficientes para o estudo do escoamento do escoamento. Na Fig.4.22 apresentam-se as dimensões do domínio de integração em função da distância à origem do referencial que se apresenta na Fig.4.22 (a).



(a)

Size and Conditions	
 x	5.12961343 m
 x	-4.12976806 m
 y	4.0577582 m
 y	-3.06770061 m
 z	4.12976806 m
 z	-3.09376806 m

(b)

Fig.4.22 – Representação do domínio de integração do módulo da torre (a) e suas dimensões (b)

Relativamente à malha gerada pelo *Fluid Flow* esta, por defeito, apresenta elementos hexaedros de dimensões reduzidas, esta dimensão foi obtida pela aplicação de um refinamento da malha de nível 1. Na Fig.4.23 apresenta-se a malha gerada para o módulo da estrutura dentro do domínio de integração.

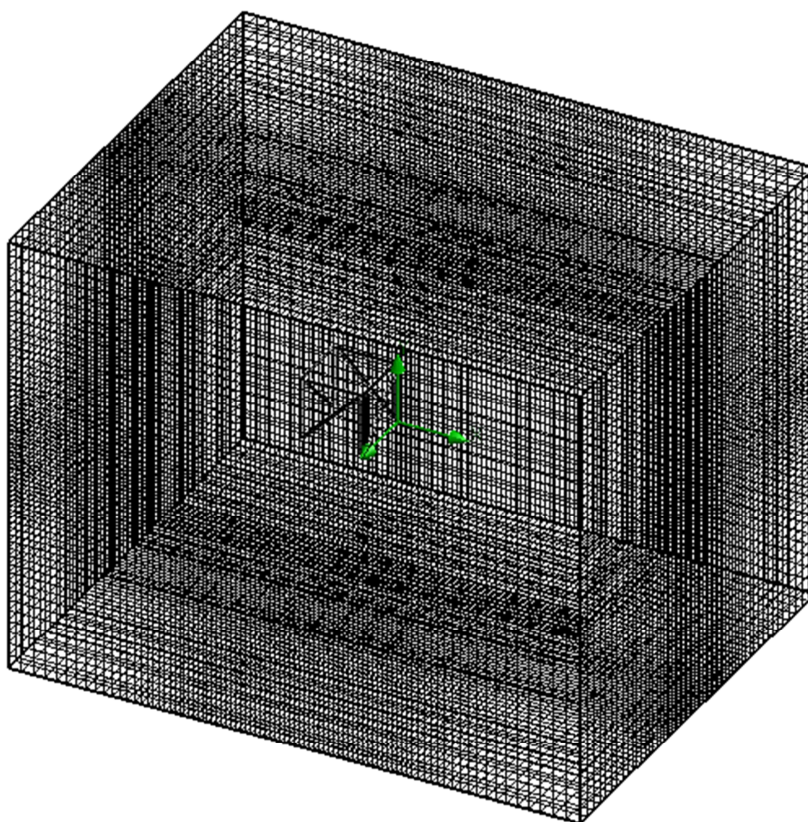


Fig.4.23 – Malha Gerada para o módulo da estrutura



#### 4.6.1.3. Análise de Forças e Pressões Geradas

Posteriormente à inserção de todos os parâmetros relativos ao estudo do escoamento e às opções tomadas para o seu estudo definiram-se os objetivos da análise, onde se determinou as forças e as pressões geradas no módulo da estrutura. A análise demorou cerca de 40 minutos, até atingir a convergência de resultados, que ocorreu ao fim de 141 iterações. No quadro 4.11 são apresentados os resultados obtidos da análise realizada. De forma a perceber o campo de pressões e consecutivamente de forças geradas no módulo da torre, na Fig.4.24 apresentamos as linhas de corrente da velocidade na direção no escoamento.

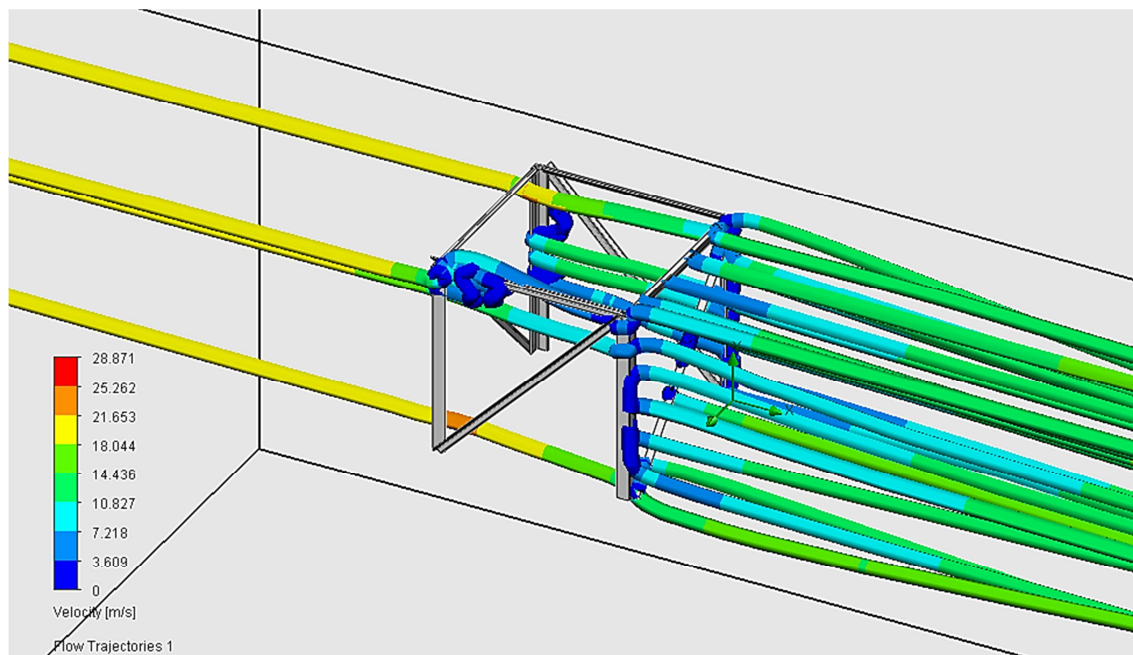


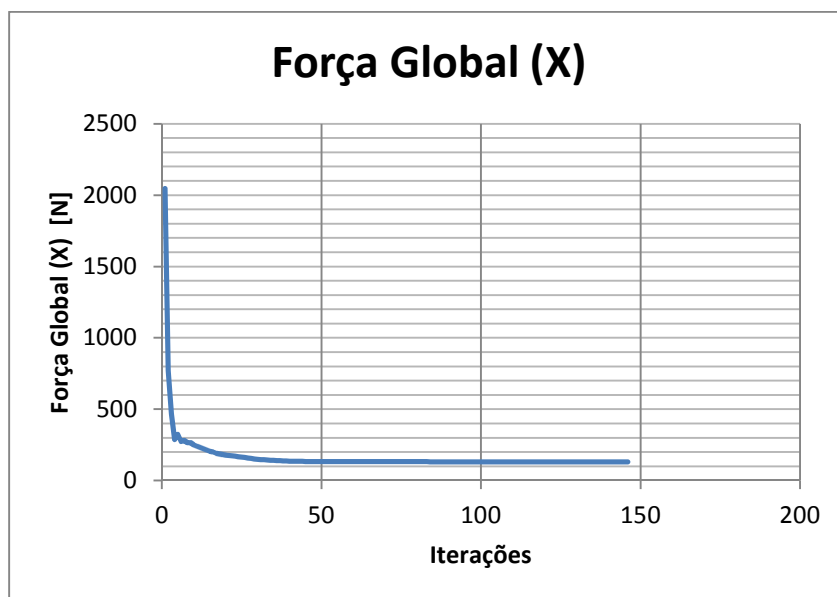
Fig.4.24 – Escoamento em torno do módulo, observação das linhas de corrente

Analisando a Fig.4.24 observa-se que ocorre uma maior concentração das linhas de corrente junto das seções verticais, locais onde se geram as pressões mais elevadas. Este facto deve-se a estas apresentarem uma zona de contacto mais elevado. Pode-se ainda observar a ocorrência de rotações, vórtices, nos locais a jusante do escoamento, estes fenómenos podem ser observados mais em pormenor no capítulo 3.

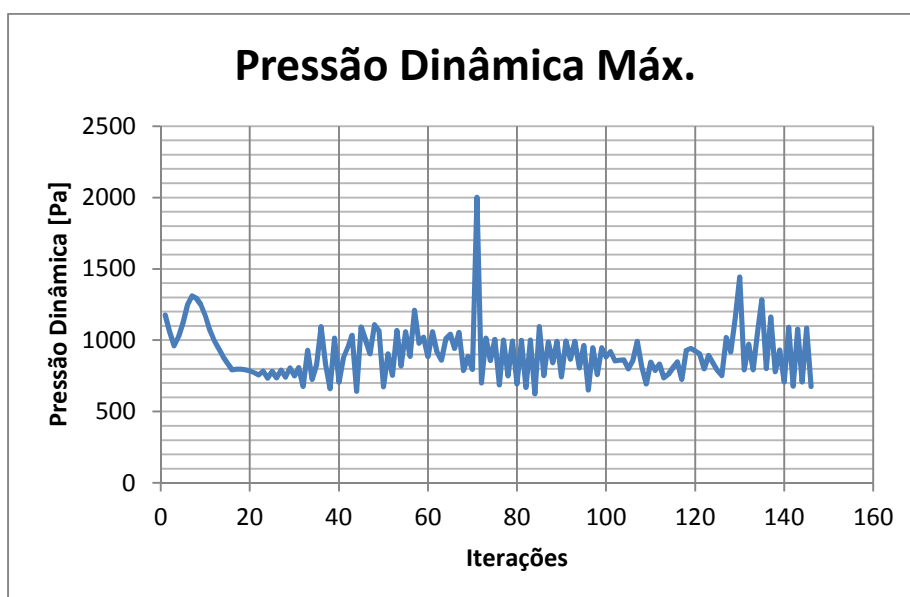
Quadro 4.11 – Pressões e Forças resultantes

	Unidades	Valor
Força Global (X)		
(média)	[N]	130.74
Pressão Dinâmica Máx.		
(média)	[Pa]	676.56

Na Fig.4.25, são apresentados os gráficos de convergência, que geraram a força global (X) e a pressão dinâmica apresentadas no quadro 4.11, em função do número de iterações.



(a)



(b)

Fig.4.25 – Gráfico de convergência da Força Global (X), (a) e da Pressão Dinâmica Máx (b)

#### 4.6.1.4. Análise Comparativa de Resultados

Comparando os resultados obtidos da análise CFD com os obtidos no quadro 4.8, referentes a Z igual a 1 metro, verifica-se uma existir proximidade de resultados entre as pressões dinâmicas e a força média do vento. Apresentando um diferença de cerca de 23%, que poderá ser justificada pela diferença



entre o coeficiente de força gerado pela análise CFD no *SolidWorks* e o obtido pela norma[21]. Com isto, assumimos o *software* calibrado para a análise na íntegra da estrutura.

#### 4.6.2. MODELAÇÃO DA ESTRUTURA

A modelação da torre, estrutura treliçada, teve por base a calibração realizada no subcapítulo 4.6.1.1, excetuando o parâmetro da velocidade, introduzindo-se um perfil de velocidades em altura. Este perfil foi determinado segundo a norma [20] e apresentado no quadro 4.8. Na Fig.4.26 é reproduzido graficamente o perfil de velocidades definido para o estudo do escoamento em torno da estrutura.

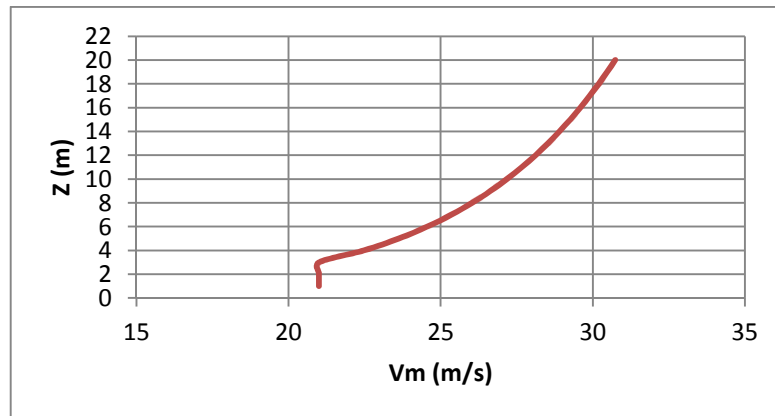
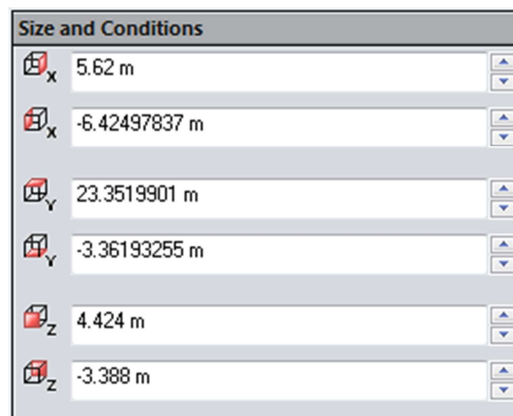


Fig.4.26 – Perfil de Velocidades do Vento em altura

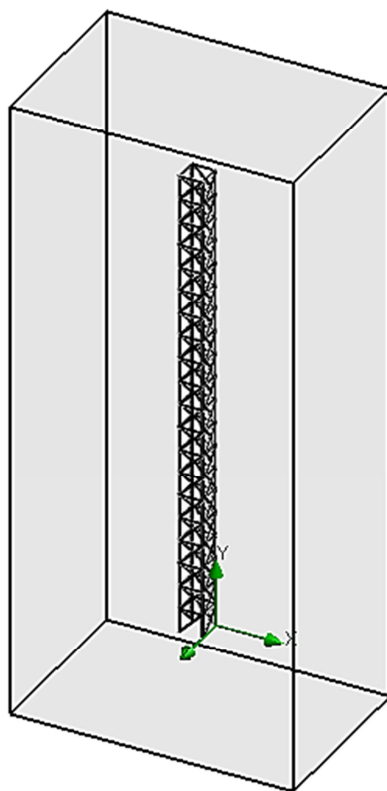
##### 4.6.2.1. Características da Malha e do Domínio de Integração

Mantendo os mesmos padrões definidos no subcapítulo 4.6.1.2 e o mesmo grau de resolução definido na Fig.4.21, na Fig.4.27 e 4.28 é apresentado o domínio de integração e a malha gerada para o estudo do escoamento em torno da estrutura. As dimensões do domínio são apresentadas em função da distância à origem do referencial que se apresenta na Fig.4.27 (b). A malha da estrutura foi representada em 2D de forma a serem perceptíveis os elementos criados em torno da estrutura.



(a)

Fig.4.27 - Representação do domínio de integração da estrutura (a) e suas dimensões (b)



(b)

Fig.4.27 - Representação do domínio de integração da estrutura (a) e suas dimensões (b)

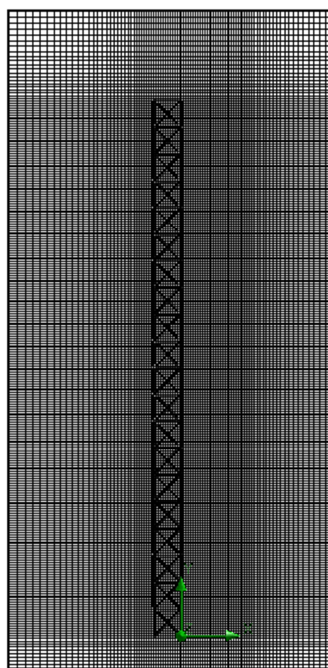


Fig.4.28 - Malha Gerada para a estrutura

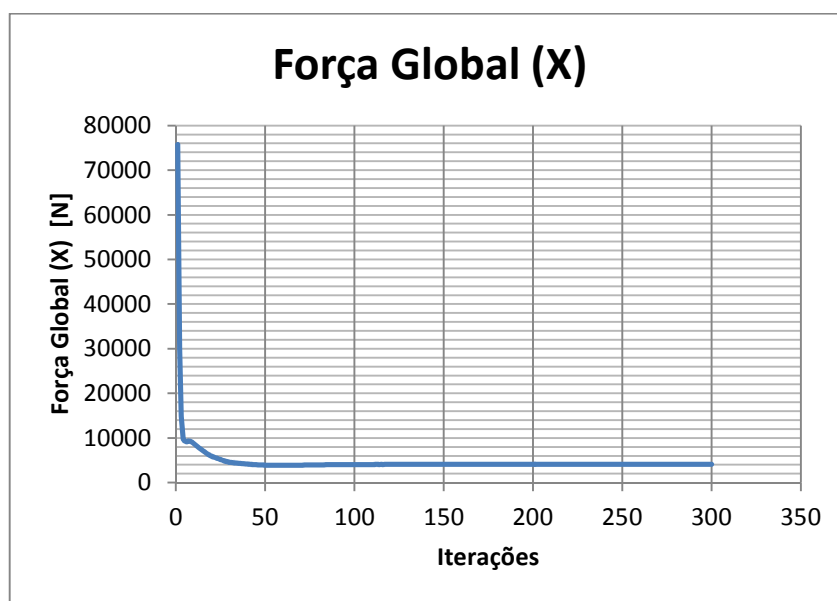
#### 4.6.2.2. Análise de Forças e Pressões Geradas

Após finalizar o procedimento de introdução dos parâmetros relativos ao estudo do escoamento e às opções tomadas para o seu estudo definiram-se os objetivos da análise, onde se determinou as forças e as pressões geradas na estrutura. A análise demorou cerca de 5 horas, até atingir a convergência de resultados, que ocorreu ao fim de 300 iterações. No quadro 4.12 são apresentados os resultados obtidos da análise realizada. Devido a limitações computacionais, não foi possível obter as linhas de corrente do perfil de velocidades, geradas na estrutura.

Quadro 4.12 – Forças e pressões geradas na estrutura

	Unidades	Valor
Força Global (X)	[N]	4076.61
Pressão Dinâmica Máx.	[Pa]	1785.98

Na Fig.4.29, são apresentados os gráficos de convergência, que geraram a força global (X) e a pressão dinâmica apresentadas no quadro 4.12, em função do número de iterações.



(a)

Fig.4.29 - Gráfico de convergência da Força Global (X), (a) e da Pressão Dinâmica Máx (b)



(b)

Fig.4.29 - Gráfico de convergência da Força Global (X), (a) e da Pressão Dinâmica Máx (b)

Na Fig.4.30 é apresentado o campo de pressões gerado na estrutura, obtido pela análise CFD. A estrutura foi dividida em 4 módulos de forma a ser perceptível a escala de cores das pressões na estrutura.

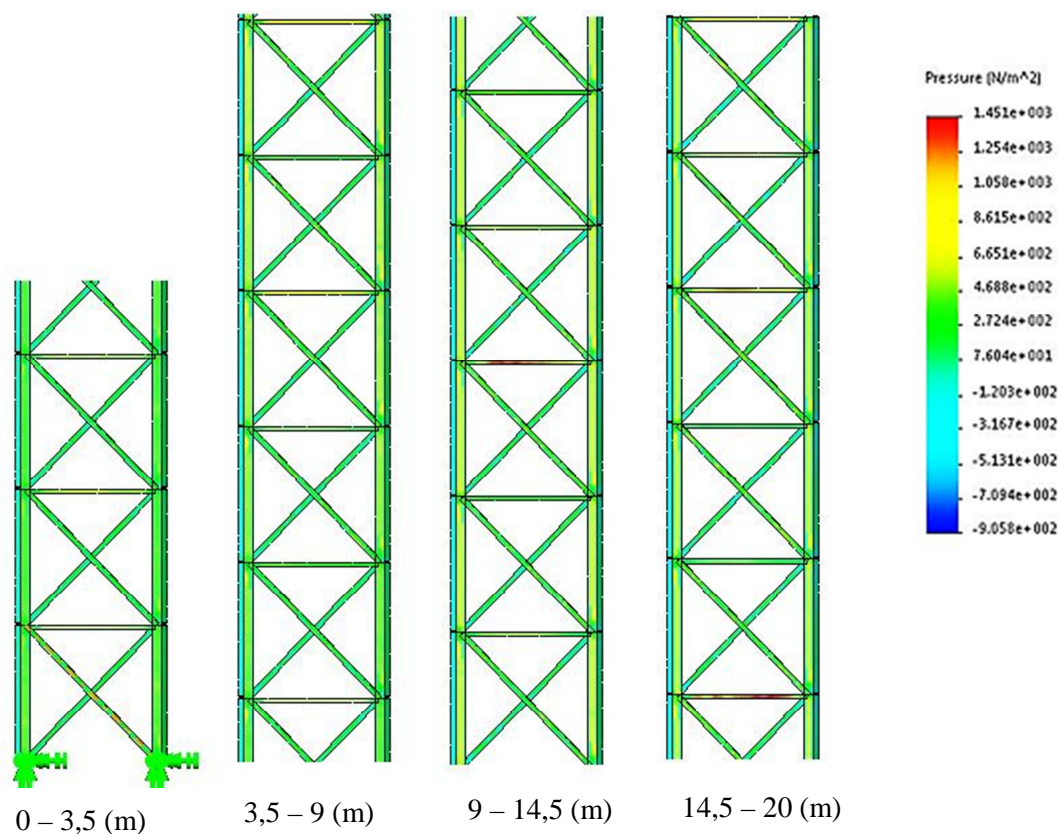


Fig.4.30 – Vista das pressões na direção na face de barlavento da estrutura

#### 4.6.2.3. Análise Comparativa de Resultados

Analisando a pressão máxima obtida pela análise CFD, e comparando-a com a pressão máxima obtida no cálculo analítico pela norma [20], ver quadro 4.9, verifica-se que esta se encontra cerca de 500 Pa acima do esperado, esta diferença poderá ser justificada pela precisão na análise CFD das pressões na estrutura. Relativamente à força global obtida, averiguou-se que esta se aproxima do somatório de forças médias do vento determinadas pela norma, ver quadro 4.9.

### 4.7. ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES E REAÇÕES DA ESTRUTURA REFERENTES À ANÁLISE CFD

#### 4.7.1. VALIDAÇÃO DO MODELO DE CÁLCULO DO *SOLIDWORKS* PARA A ANÁLISE ESTÁTICA

Antes de proceder à análise das deformações e reações da estrutura associadas às pressões obtidas na análise CFD, através de uma análise estática, efetuou-se uma validação do *software SolidWorks* para o mesmo tipo de análise, onde se analisou os deslocamentos associados à aplicação de uma carga horizontal de 20 kN no topo da estrutura. O mesmo caso foi analisado pelo *software Robot*. Na Fig.4.31 são apresentados os resultados dos deslocamentos obtidos da modelação pelo *SolidWorks* e pelo *Robot*. A carga foi distribuída pontualmente pelos 4 nós da estrutura.

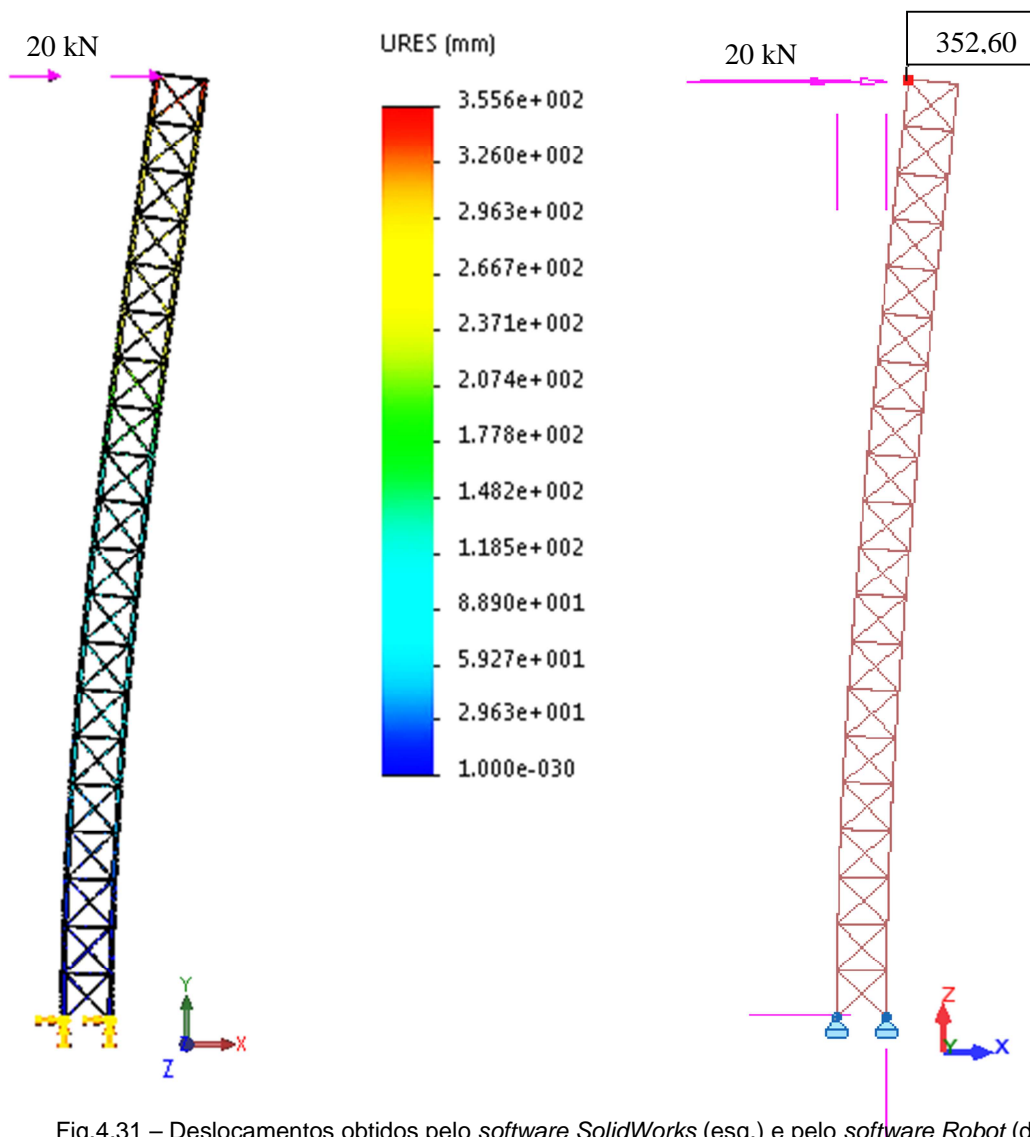


Fig.4.31 – Deslocamentos obtidos pelo *software SolidWorks* (esq.) e pelo *software Robot* (dir.)

Analisando os resultados obtidos pelo *Solidworks* e pelo *Robot*, Fig.4.31, verifica-se existir uma diferença entre eles de cerca de 0,85%. Um dos fatores que poderá justificar a diferença de resultados, é a geometria da torre, onde no modelo criado no *SolidWorks* apresenta uma pequena diferença na inclinação das barras de travamento, diagonais, em que por motivos de dificuldade na criação da geometria, estas não se apresentam exatamente a 45°. Posto isto, e em conformidade com os resultados obtidos considera-se validado o modelo numérico pelo *Solidworks*.

#### 4.7.2. ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES E REAÇÕES DA ESTRUTURA ASSOCIADAS ÀS PRESSÕES OBTIDAS NA ANÁLISE CFD

De modo a se obter as deformações e reações da estrutura, foi realizada uma análise estática no *SolidWorks*, onde se importou, para a análise, o campo de pressões geradas na estrutura, obtidas da análise CFD pelo *FluidFlow*. Na Fig.4.32 apresentamos a opção que permite importar as pressões obtidas do *FluidFlow* para a análise estática.

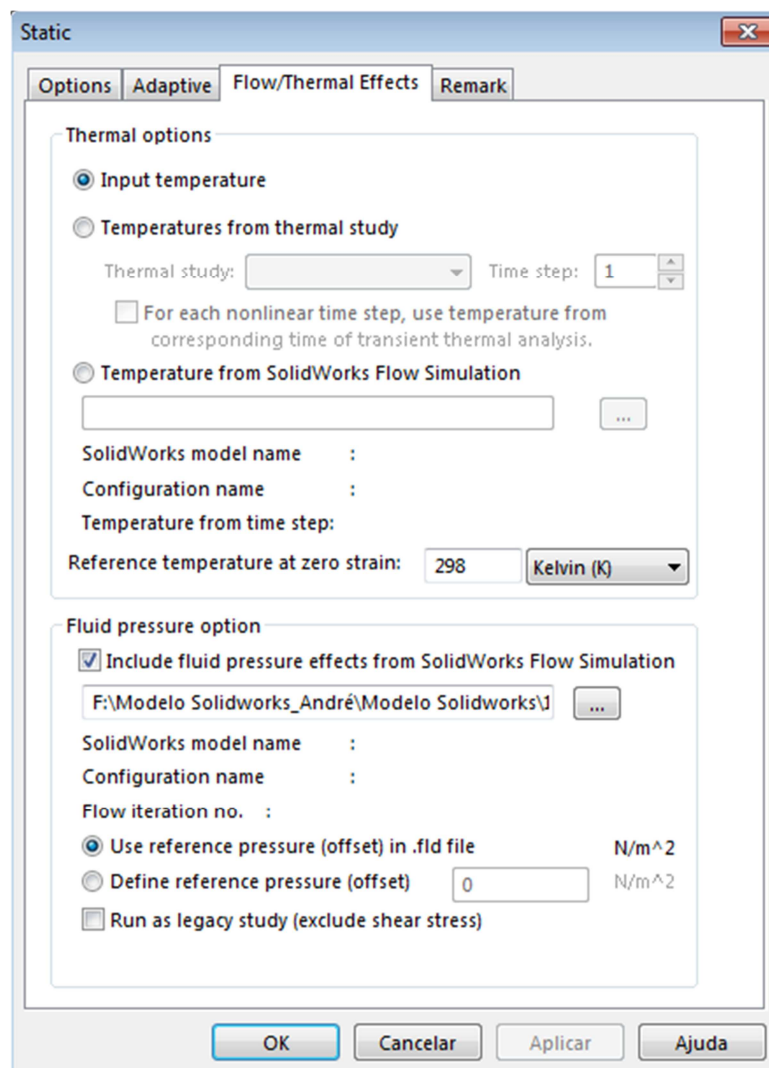


Fig.4.32 – Comando “External Loads – Flow Effects”, *SolidWorks*

Posto isto, realizou-se a análise estática das pressões, onde se obtiveram os deslocamentos e as reações, na base, da estrutura. Os resultados conseguidos podem ser observados na Fig.4.33, e quadro 4.13.

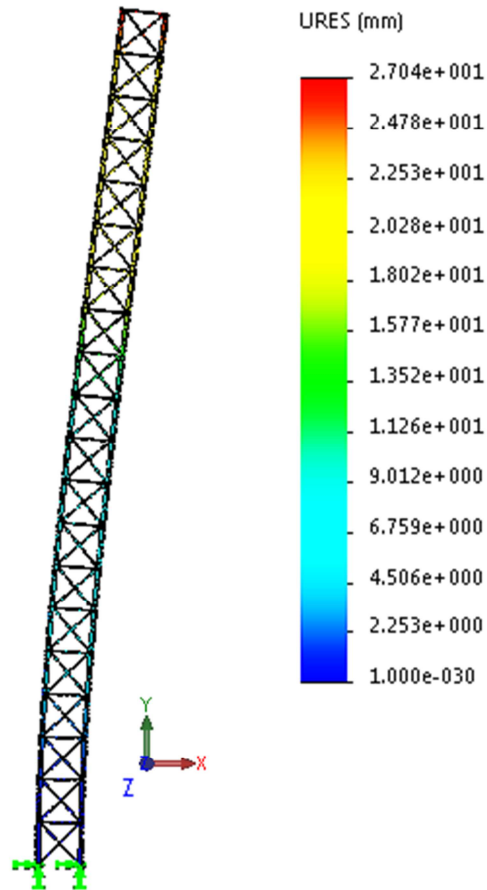


Fig.4.33 – Deslocamentos da estrutura - Análise SolidWorks

Quadro 4.13 – Reações nos apoios - Análise SolidWorks

Apoios	FX (KN)	FY (KN)	FZ (KN)
1	-1,53	-20,70	0,046
2	-0,08	17,60	-0,02
3	-0,09	-17,70	0,21
4	-1,67	20,30	0,04

#### 4.8. ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS OBTIDOS PELA ANÁLISE CFD E EUROCÓDIGO EN 1991-1-4

Visto que a análise CFD determina as pressões geradas na estrutura em função do perfil de velocidades médias, ou seja, não tem em conta, no seu cálculo os parâmetros geométricos e estruturais da estrutura, parâmetros que definem o coeficiente estrutural, não é possível realizar uma análise comparativa com as forças de rajada obtidas no quadro 4.9. Posto isto, e de forma a realizar uma análise comparativa dos deslocamentos e reações obtidas da análise CFD procedeu-se a uma análise estática das forças média do vento, determinadas pela EN 1991-1-4, ver quadro 4.9. Assim, na Fig. 4.34, e no quadro 4.14 são apresentados os resultados obtidos da análise realizada em função das forças médias do vento. A aplicação da carga teve por base o método apresentado no subcapítulo 4.5.

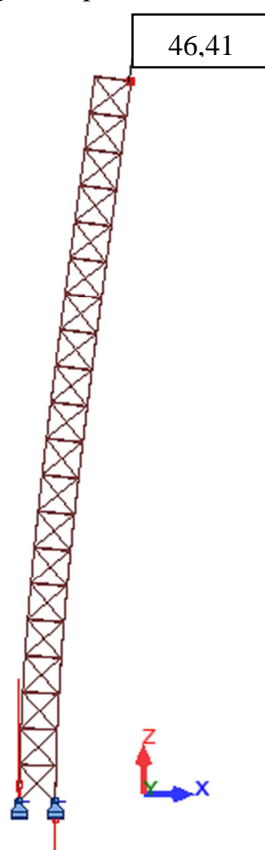


Fig.4.34 – Deslocamento máximo da estrutura em mm

Quadro 4.14 – Reações nos apoios

Apoios	FX (KN)	FY (KN)	FZ (KN)
1	-2,79	-0,02	-32,78
2	0,03	0,02	32,78
3	0,03	0,02	-32,78
4	-2,79	-0,02	32,78



Ao observar os deslocamentos obtidos na análise pelo *software Robot*, Fig.4.34, verifica-se que estes apresentam um deslocamento cerca de 70% superior ao obtido pelo *software SolidWorks*, Fig.4.33. Esta diferença revela-se ainda nas reações verticais e horizontais obtidas. Esta diferença, que não se revelou na validação realizada no subcapítulo 4.7.1, poderá ser em parte justificada pelo método conservativo que foi usado na modelação da ação do vento na estrutura pelo *Robot*, onde se concentrou a ação do vento nos nós da estrutura. Este tipo de método não se verifica na análise CFD, onde as pressões são distribuídas uniformemente por todas as barras da estrutura, como podemos ver Fig.4.30. Ainda assim, um dos fatores que poderá justificar esta diferença de resultados é o coeficiente de força gerado pela análise CFD, diferença esta que já foi verificada no subcapítulo 4.6.1.4.

#### 4.9. CONCLUSÃO

Este estudo computacional da estrutura treliçada sujeita a um regime permanente do vento, permitiu identificar as principais influências que os diversos componentes da estrutura têm sobre o escoamento.

Visto se tratar de uma estrutura vazada, e por isso com menor resistência ao vento, verificou-se, tal como esperado, que as pressões se distribuíam por todos os elementos da estrutura, sendo que nos elementos de área inferior se localizaram elevadas pressões, mais precisamente nas travessas (os elementos horizontais), não criando, deste modo, um campo de pressões pontual nos elementos verticais (os elementos principais da estrutura). Como a análise CFD realizada não contemplou evolução temporal da velocidade, não foi possível obter o comportamento dinâmico da estrutura; ou seja não foi possível determinar o parâmetro  $C_s C_d$ , que por sua vez está ligado à determinação da força de rajada usada no dimensionamento da estrutura. O que faz com que os resultados apresentados pela análise CFD sejam comparáveis com os valores médios obtidos pela norma [20].

Contudo, uma vez analisados os resultados obtidos pela análise CFD e pela EN 1991-1-4, concluiu-se que a norma [20], apresenta resultados conservativos, o que faz com que a análise CFD seja importante para um caso de otimização da estrutura, desde que seja devidamente validada por ensaios experimentais, de preferência à escala real, até atingir um grau de confiança adequado, que permita encarar esta ferramenta com maiores certezas.



# 5

## CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. CONCLUSÃO

Dos vários estudos dos escoamentos realizados ao longo desta dissertação, destacam-se as seguintes conclusões:

1. No estudo dos vários escoamentos, salienta-se a criação da malha como a componente principal na precisão dos resultados obtidos, dado que se verificou uma elevada disparidade de resultados com variação da dimensão dos elementos. Assim se conclui que a malha apresentada gera resultados mais fidedignos.
2. O estudo do escoamento em torno de uma secção angulosa permitiu concluir que, os vários modelos de turbulência usados não tinham influência nos resultados obtidos, porém o modelo  $k-\epsilon$  Realizable é o que apresenta melhor definição na representação dos fenómenos de recirculação.
3. A análise comparativa de resultados do estudo do escoamento de uma secção angulosa, pela análise CFD *Ansys Fluent* com as normas [20-22] e ensaios experimentais [2] revelou proximidade e semelhanças entre resultados, concluiu-se que: (a) a análise CFD apresenta resultados mais conservativos que os resultados experimentais [2] e que a norma Britânica (B.S.) [22]; (b) a EN 1991-1-4 [20] é a que apresenta é mais conservativa. Deste modo conclui-se que a ferramenta de análise CFD *Ansys Fluent*, para o estudo de escoamentos de seções angulosas, apresenta resultados fidedignos, à exceção do estudo de uma estrutura treliçada espacial que apresentou resultados disparos em relação aos obtidos pela norma [20]. Mesmo assim a análise CFD *Ansys Fluent* apresenta-se como uma excelente ferramenta de observação de escoamentos, apresentando-se com boa definição e precisão, nas linhas de corrente do escoamento e em todos os fenómenos que ocorrem na vizinhança das secções.
4. A análise comparativa, para a torre treliçada espacial, entre a análise CFD e análise analítica pela EN 1993-3-1 e NP EN 1991-1-4 revelou que a primeira apresenta pressões máximas mais elevadas na estrutura do que as determinadas pela segunda. Relativamente à força global gerada pelas pressões, estas apresentaram-se superiores às determinadas pela análise CFD. Com isto conclui-se que a EN 1991-1-4 apresenta resultados mais conservativos na determinação da ação do vento na torre.
5. Prevê-se ainda, para as estruturas estudadas, uma longa fase de validação do modelo numérico CFD através de ensaios experimentais à escala real, de forma a ganhar-se uma

maior confiança neste tipo de ferramentas mais avançadas e integrá-las como instrumentos na Engenharia de Estruturas.

## 5.2. TRABALHOS FUTUROS

Face à realidade temporal de um semestre para a elaboração desta dissertação de MIEC, apenas se realizaram simulações para o estudo do escoamento da torre, com um ângulo de ataque nulo relativamente à face de barlavento e para um tipo de estrutura treliçada. A obtenção dos coeficientes de força de resistência aerodinâmica gerados para diversos ângulos de ataque e para estruturas de geometria mais complexa seria de grande utilidade para uma caracterização mais completa do comportamento aerodinâmico deste tipo de estruturas treliçadas.

Também será interessante aprofundar a obtenção de resultados para um universo maior de variação paramétrica de bitolas de secções angulosas, espaçamentos entre secções e variabilidades de tipologias seccionais.

No caso de estruturas utilizando perfis tubulares de secção circular (ou não) poderá ser também conclusivo e justificável o recurso a CFD, para o estudo e melhor compreensão do fenómeno de partilha de vórtices (*Vortex Shedding*) nestas situações.

Sugere-se ainda o estudo mais aprofundado das modelações CFD, recorrendo à utilização de supercomputadores, de modo a que seja possível a observação mais precisa dos fenómenos que ocorrem nas vizinhanças das secções.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Lopes, A.V., *Acção do vento e a resposta dinâmica de edifícios altos*. 1992, Porto, FEUP, Dissertação Mestrado.
- [2] Klein, T., *Estudo em túnel de vento das características aerodinâmicas de torres metálicas treliçadas*. 2004, Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação Mestrado.
- [3] Smith, B.W., *Communication structures*. 2007: Thomas Telford.
- [4] Paiva, F., Henriques, J. and Barros, R.C. *Review of Transmission Tower Testing Stations Around the World*. Procedia Engineering, 2013. **57**: p. 859-868.
- [5] Travanca, R.M.C.A., *Torres para radiocomunicações: patologias e dimensionamento*. 2010.
- [6] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. 2007: Pearson Education.
- [7] Ferziger, J.H. and Perić, M., *Computational methods for fluid dynamics*. Vol. 3. 2002: Springer Berlin.
- [8] Novais-Barbosa, J., *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral (Vol. 1)*. Porto: Porto Editora, 1986.
- [9] Abbott, M.B. and Basco, D.R., *Computational fluid dynamics-An introduction for engineers*. NASA STI/Recon Technical Report A, 1989. 90: p. 51377.
- [10] Ansys, A.F., *14.0 Theory Guide*. ANSYS inc, 2011.
- [11] Rosado, A.N.R.d.P., *Estudo do escoamento em torno da secção de uma ponte simulação computacional*. 2010, Porto, FEUP, Dissertação Mestrado.
- [12] Kareem, A. and Tamura, Y., *Advanced structural wind engineering*. 2013: Springer.
- [13] Lopes, A.V., *Aplicação da dinâmica computacional de fluidos à análise aeroelástica de estruturas esbeltas*. 2002, Coimbra, FCTUC, Tese de Doutoramento.
- [14] Gonçalves, N.D.F., *Método dos Volumes Finitos em Malhas não estruturadas*, 2007, Porto, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Dissertação Mestrado.
- [15] Zuo, W., *Introduction of Computational Fluid Dynamics* 2005, JASS, St. Petersburg.
- [16] Tamura, T., Nozawa, K. and Kondo, K., *AIJ guide for numerical prediction of wind loads on buildings*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008. 96(10): p. 1974-1984.
- [17] Bastos, F., Caetano, E. and Cunha, Á. *The viaduc de la Grande Ravine: numerical evaluation of flow pattern*. 2010, Internal Report of Vibest: Porto.
- [18] Rosado, A.N.R.d.P., Paredes, M.M., and Barros, R.C., *Analysis of Wind Flow Around Bridge Sections and Filled Tank Water Sloshing Using CFD Modelling Software*, in *6º CLME (Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia) e 3º CEM (Congresso de Engenharia de Moçambique)*. 2011: Maputo (Mozambique)
- [19] Rosado, A.N.R.d.P., Paredes, M.M., and Barros, R.C., *Comparação dos Resultados Experimentais e Computacionais da Oscilação da Água em Tanque Rectangular sob Acções Harmónica e Sísmica*, in *Congresso Internacional de Metodos Numericos em Engenharia (CMNE / CMNI 2011)*. 2011: Coimbra.

- [20] Instituto Português da Qualidade, *Eurocódigo 1 acções em estruturas Parte 1-4 acções gerais. Acções do vento NP EN 1991-1-4:2010/A1: 2010*. 2010, Caparica: IPQ. 12 p-12 p.
- [21] (CEN), *EN 1993-3-1: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 3-1: Towers, masts and chimneys – Tower and masts. European*. 2009, Brussels.
- [22] Standard, B., *Code of basic data for the design of buildings. Loading. Wind loads*. 2003.
- [23] Henriques, J., *Projecto de torres eólicas reticuladas de grande altura (150M) modelação e análise comparativa com estruturas tubulares auto-suportadas*. 2012, Porto, FEUP, Dissertação Mestrado.
- [24] Barros, R.C., Ferreira, N.A.C. and Delgado, R., *Effects of Wind in Tall Buildings: a comparison for a real case and its vibration control using a Tuned Mass Damper*, in *Tall Buildings: Design Advances For Construction*, J.W. Bull, Editor. 2013, Saxe-Coburg UK.
- [25] Paiva, F. and Barros, R.C., *Comparison of a Cantilever Sign Support Response Subjected to wind Gusts, With and Without a TMD in COMPDYN 2013 : 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering* V.P. M. Papadrakakis, V. Plevris, Editor. 2013: Greece.
- [26] Paiva, F. and Barros, R.C., *Analysis of the stability and design of cantilevered sign supports in highways*, in *Recent Advances in Integrity-Reliability-Failure*, U.P.S.A.M.M. J.F. Silva Gomes (FEUP, U. Toronto), Editor. 2013, INEGI: Funchal - Madeira - Portugal.
- [27] Paiva, F., Henriques, J. and Barros, R.C., *Design of lattice wind towers and comparison with the typical self-supported tubular towers*, in *Recent Advances in Integrity-Reliability-Failure*, U.P.S.A.M.M. J.F. Silva Gomes (FEUP, U. Toronto), Editor. 2013, INEGI: Funchal - Madeira - Portugal.
- [28] Henriques, J. and Barros, R.C., *Comparison of a Tall Lattice Wind Tower Response With and Without a TMD*, in *COMPDYN 2013 : 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering* V.P. M. Papadrakakis, V. Plevris, Editor. 2013: Greece.
- [29] Holmes, J.D., *Wind loading of structures*. 2001: CRC Press.
- [30] Chopra, A.K., *Dynamics of structures*. Vol. 3. 1995: Prentice Hall New Jersey.
- [31] Clough, R.W. and J. Penzien, *Dynamics of structures*. 1975.

## **ANEXO A**





## Ação do Vento

### Velocidade Média

Zona	A
Vb,0	27.00 m/s
Tipo Terreno	II
Z <sub>0</sub>	0.05 m
Z <sub>min</sub>	3.00 m
Z <sub>max</sub>	200.00 m
C <sub>senso</sub>	1
C <sub>dir</sub>	1

Quadro NA  
4.1

Recomenda  
EC

C <sub>r</sub> (z)	1.138	k <sub>r</sub>	0.19
C <sub>o</sub> (z)	1	Z <sub>0,II</sub>	0.05
V <sub>m</sub> (z)	30.74 m/s		

Cuidado com estruturas superiores  
a 200m

V <sub>b</sub>	27.00 m/s
----------------	-----------

Z	20.00 m	Altura Total
---	---------	--------------

### Turbulência

K <sub>t</sub>	1
σ <sub>w</sub>	5.13
I <sub>w</sub> (z)	0.1669041

### Pressão do Vento

ρ	1.25 kg/m <sup>3</sup>
q <sub>a</sub> (z)	1280.28 Pa
q <sub>b</sub> (z)	455.63 Pa

### Força Do Vento

A <sub>ref</sub>	4.33 m <sup>2</sup>	A <sub>ref,panel</sub>	0.22 m <sup>2</sup>
q <sub>a</sub> (ze)	1280.28 N		
$F_{m,W}(z) = \frac{q_p}{1 + 7 \cdot I_v(z_e)} \sum C_f \cdot A_{ref}$			
$F_{T,W}(z) = F_{m,W}(z) \cdot \left[ 1 + \left[ 1 + 0.2 \cdot \left( \frac{z_m}{h} \right)^2 \right] \cdot \frac{[1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot c_d \cdot c_d - 1}{c_d(z_m)} \right]$			
F <sub>m,w</sub> (Z)	365.43 N		
F <sub>T,w</sub> (Z)	956.26 N		
	QU		
F <sub>w</sub> (z)	928.12 N		

### Coefficiente Força

C <sub>f</sub>	2.860026682	A <sub>f</sub> = A <sub>s</sub> , porque só existem elementos angulosos na estrutura			
C <sub>f,s</sub>	2.860026682				
k <sub>Q</sub>	1	K1	0.55	A <sub>f</sub> =A <sub>s</sub>	1
		K2	0.2164	Área	Projetada
		θ	0	Angulo Incidência Plano	
		φ	0.2164		

$$c_{f,0,f} = 1,76 \cdot C_1 \cdot [1 - C_2 \cdot \varphi + \varphi^2]$$

$$K_2 = \varphi \text{ se } 0,2 < \varphi \leq 0,5$$

$$K_2 = 0,2 \text{ se } 0 \leq \varphi \leq 0,2 \text{ e } 0,8 \leq \varphi \leq 1,0$$

$$K_2 = 1 - \varphi \text{ se } 0,5 < \varphi < 0,8$$

$$\varphi = \frac{A}{A_c}$$

C <sub>1</sub>	para base quadrada	2.25
	para base triangular	1.9
C <sub>2</sub>	para base quadrada	1.5
	para base triangular	1.4

A	4328000.00 mm <sup>2</sup>
A <sub>c</sub>	20000000.00 mm <sup>2</sup>

h)

**CsCd**

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 \cdot k_p \cdot I_v(z_s) \cdot \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 \cdot I_v(z_s)}$$

CsCd 1.171309678  
Iv(zs) 0.182460478

Zs 12.00 m OK

B²	0.702377013	b	1.00 m	Zt	200.00 m	B² = $\frac{1}{1 + 0.9 \cdot \left(\frac{b+h}{L(z_s)}\right)^{0.63}}$
		h	20.00 m			
		L(zs)	69.42			
		Lt	300.00 m			
		α	0.520213386			

R²	0.903121532	n1,x	0.80 Hz	K	75.56 KN/m	W	5.03 rad	F	0.80 Hz
				M	2.99 ton				
		fL(zn)	1.98						
		SL(zn)	0.0831						
		nh	2.62	Rh	0.309				
		nb	0.13	Rb	0.918				
		δ	0.128932075	δs	0.02				
				δa	0.108932075	me	576.7039089	φ1	1
				δd	0	n1	0.80 Hz	ζ	2.5

Torres  
Trelçadas

Cr(zs)	1.041	kr	0.19
Co(zs)	1	Z0,II	0.05

Co(zs) 1

Vm(zs) 28.12 m/s

$$k_p = \sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)} + \frac{0.6}{\sqrt{2 \cdot \ln(v \cdot T)}}$$

$$v = n_{1,x} \sqrt{\frac{R^2}{B^2 + R^2}} ; v \geq 0.08 \text{ Hz}$$

Kp	3.605942339	φ	0.600009501	OK
Verificação	OK	T	600.00 s	